

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
JEAN MICHEL CHAVES ORBEN

ESTRUTURAS METÁLICAS: DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS VIA
TÉCNICA SECTION GOLD

CASCABEL
2021

JEAN MICHEL CHAVES ORBEN

**ESTRUTURAS METÁLICAS: DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS VIA
TÉCNICA SECTION GOLD**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Me. Eng. Bruno dos Santos.

CASCADEL

2021

Dedico este trabalho a minha avó Marilene e ao meu grande amigo Paulo Fank.
Quantas vezes me disseram que faziam questão de presenciar minha formatura!
Infelizmente, o tempo teve outros planos...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais Fortunato e Miriam Orben pelo dom da vida e por me mostrarem a importância da busca pelo conhecimento desde o nascimento, me nomeando por um cientista! Também, por todo o suporte financeiro para este fim, muitas vezes advindo de sacrifícios pessoais e incansáveis horas de trabalho. Posso não ter seguido exatamente vossos passos, por vezes contrariando-os puramente por esporte, mas isso não diminui o amor e a admiração que sinto! Sou eternamente grato!

Agradeço ao meu orientador e amigo, Bruno dos Santos, por acreditar em mim, especialmente nos momentos em que nem eu mesmo acreditei. Por fomentar o meu interesse pela pesquisa, resistência dos materiais e estruturas metálicas. Pela forma que me orientou, pela paciência, pelas correções e sugestões. Seus conhecimentos e direcionamentos foram indispensáveis para a elaboração deste trabalho. Desde que o conheci, é uma grande inspiração para mim. É uma honra ser seu orientando. Muitíssimo obrigado!

Ao professor Sérgio Henrique Rodrigues Mota, por sempre incentivar o debate e o pensamento crítico, e também por servir de inspiração e exemplo.

A todo o corpo docente do Centro Universitário Assis Gurgacz que me lecionou, pelos conhecimentos compartilhados.

A todos os meus amigos e familiares, por tornarem a vida mais alegre e serem companhia constante, especialmente nos momentos difíceis.

À minha irmã, Marina Orben, por ser uma grande amiga e sempre me incentivar.

Ao meu irmão, Alisson Zamprônio, por nunca ter duvidado de mim.

Ao meu avô, “Seu Chaves”, por todo o cuidado que me deu no passado e pela honra de poder cuidar de ti hoje.

Ao meu amigo Arthur Zulian, pelas aulas de SolidWorks e diversos auxílios prestados durante o curso.

Ao meu amigo Luciano Michelin, por me ajudar a não perder o foco, especialmente na reta final da graduação.

À minha namorada e melhor amiga, Rafaela Adam Baioco, por me inspirar a ser sempre a melhor versão de mim. Por caminhar ao meu lado mesmo durante os momentos de incerteza, tristeza e angústia, lembrando-me que são efêmeros. Por

sempre me acolher sorrindo e planejar comigo o futuro, sem deixar de aproveitar o presente. Concluído este trabalho, damos mais um passo em direção ao que planejamos!

"I would rather have questions that can't be answered than answers that can't be questioned."

Richard Feynman

RESUMO

ORBEN, Jean Michel Chaves. **Estruturas metálicas:** dimensionamento de colunas via técnica Section Gold, 2021. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Assis Gurgacz. 2021.

Devido à flexibilidade e à rapidez na construção das estruturas metálicas, seu uso vem crescendo significativamente, representando uma fatia considerável do mercado da construção civil. Para torná-las ainda mais competitivas, busca-se minimizar o material utilizado mantendo os mesmos níveis de segurança, reduzindo assim os custos de produção e acelerando o processo de construção. Este trabalho descreve o projeto estrutural de uma coluna conforme NBR 8800 e apresenta uma metodologia alternativa baseada no método de otimização Section Gold com o objetivo de reduzir a massa do perfil metálico. Para o desenvolvimento do projeto, foi dimensionada a coluna em perfil W para uma estrutura projetada para o município de Cascavel, no estado do Paraná, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 8800:2008. Posteriormente, foi desenvolvido em ambiente MATLAB o código para calcular as dimensões da coluna, minimizando a massa conforme equações clássicas da resistência dos materiais utilizando o método Section Gold. Por fim, foram comparados os valores encontrados em ambos os dimensionamentos, levando à conclusão de que o método utilizado apresenta redução dimensional de 25,56% a 52,58%, representando economia de 57% de massa da coluna, mantendo resistência à carga crítica.

Palavra-chave: Estruturas metálicas; Otimização; Section Gold; Colunas e Dimensionamento.

ABSTRACT

ORBEN, Jean Michel Chaves. **Metallic structures:** dimensioning of columns using the Section Gold technique, 2021. Undergraduate thesis (Bachelor degree of Mechanical Engineering) – Centro Universitário Assis Gurgacz. 2021.

Due to the flexibility and speed in the construction of metallic structures, its use has been growing significantly, representing a considerable share of the civil construction market. To make them even more competitive, the aim is to minimize the material used while maintaining the same safety levels, thus reducing production costs and speeding up the construction process. This work describes the structural design of a column according to NBR 8800, and presents an alternative methodology based on the Section Gold optimization method with the objective of reducing the mass of the metallic profile. For the development of the project, the column was dimensioned in a W profile for a structure designed for the municipality of Cascavel, in the state of Paraná, following the guidelines of ABNT NBR 8800:2008. Subsequently, the code to calculate the column dimensions was developed in MATLAB environment, minimizing the mass according to classical equations of resistance of materials using the Section Gold method. Finally, the values found in both designs were compared, leading to the conclusion that the method used presents a dimensional reduction from 25.56% to 52.58%, representing a saving of 57% in column mass, maintaining resistance to critical load.

Keywords: Metal structures; Optimization; Section Gold; Columns and Dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Chapas de aço carbono	20
Figura 2: Válvula hidráulica de aço liga.....	20
Figura 3: Peças de aço ferramenta.	21
Figura 4: Aço em estrutura metálica.....	21
Figura 5: Tipos de galpões metálicos.....	23
Figura 6: Terças metálicas.	24
Figura 7: Estrutura metálica com travessas em evidência.	25
Figura 8: Contraventamento em “X” em estrutura metálica.....	25
Figura 9: Colunas de estruturas metálicas em viga W.	26
Figura 10: Perfil W de aço.	27
Figura 11: Processo de projeto convencional.....	35
Figura 12: Processo de projeto otimizado.	36
Figura 13: Corte transversal do galpão.	41
Figura 14: Análise das isopletas de vento.	42
Figura 15: Cargas devidas ao vento.....	43
Figura 16: Telhas metálicas trapezoidais GERDAU.....	45
Figura 17: Telha metálica trapezoidal GERDAU.	45
Figura 18: Esforços mecânicos no pórtico para carga de compressão, em kN.....	50
Figura 19: Esforços mecânicos no pórtico para carga de tração, em kN.	51
Figura 20: Segmento áureo.....	55
Figura 21: Influência da espessura da alma sobre a carga crítica em viga W.	58
Figura 22: Influência do comprimento da alma sobre a carga crítica em viga W.	59
Figura 23: Influência do comprimento da mesa sobre a carga crítica em viga W.	60
Figura 24: Influência da espessura da mesa sobre a carga crítica em viga W.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de ponderação das ações	30
Tabela 2 - Valores fatores de combinação Ψ_0 e de redução Ψ_1 e Ψ_2 para as ações variáveis	31
Tabela 3 - Fragmento da tabela F.1 - Valores de $(b/t)_{lim}$	33

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ef}	Área efetiva da seção transversal
b	Largura dos elementos comprimidos AA
b_f	Largura da mesa
d	Altura externa da seção
E	Módulo de elasticidade do aço
$F_{gi,k}$	Valor característico das ações permanentes
$F_{Q1,k}$	Valor característico da ação principal
h	Altura da alma
I	Momento de inércia
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo y
I_x	Momento de inércia em relação ao eixo x
k	Coeficiente de flambagem
L	Comprimento do perfil
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
Q	Fator de redução
t_f	Espessura da mesa
t_w	Espessura da alma
λ	Parâmetro de esbeltez da seção transversal
χ	Fator de redução associado à resistência a compressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PANORAMA HISTÓRICO DO AÇO NO BRASIL	18
2.2	PRODUTOS E APLICAÇÕES	19
2.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AÇO ESTRUTURAL	22
2.3.1	Desvantagens	22
2.3.2	Vantagens	22
2.4	ELEMENTOS DE UM GALPÃO INDUSTRIAL	23
2.4.1	Terças	24
2.4.2	Travessas ou longarinas	24
2.4.3	Contraventamentos	25
2.4.4	Colunas	26
2.5	PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS CONFORME NBR 8000	27
2.5.1	Determinação das cargas devidas ao vento em edificações	27
2.5.2	Determinação das cargas devidas ao uso e à ocupação	27
2.5.3	Determinação das cargas devidas ao peso próprio da estrutura	28
2.5.3.1	Pré-dimensionamento das colunas	28
2.5.3.2	Pré-dimensionamento das terças	28
2.5.3.3	Pré-dimensionamento dos contraventamentos	29
2.5.3.4	Pré-dimensionamento das montantes e diagonais	29
2.5.3.5	Pré-dimensionamento dos banzos	29
2.5.4	Combinações para os estados limites últimos	29
2.5.5	Determinação dos esforços mecânicos via software Ftool	31

2.5.6	Dimensionamento das colunas	32
2.5.6.1	Verificação da esbeltez	32
2.5.6.2	Verificação da capacidade a compressão	32
2.5.6.3	Cálculo da força axial de flambagem elástica	33
2.5.6.4	Força axial resistente de cálculo	34
2.6	OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS	35
2.6.1	Conceitos de projeto ótimo	35
2.6.2	Definição de mínimo global e local	37
2.6.3	Métodos numéricos para busca unidimensional	37
2.6.3.1	Técnica de busca por intervalos	38
2.6.3.2	Método Section Gold	38
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	40
3.1	DIMENSIONAMENTO DAS COLUNAS PARA UMA ESTRUTURA METÁLICA CONFORME ABNT NBR 8800:2008	40
3.1.1	Determinação das cargas devidas ao vento	41
3.1.2	Determinação das cargas devidas ao uso e à ocupação	43
3.1.3	Determinação das cargas devidas ao peso próprio da estrutura	44
3.1.3.1	Pré-dimensionamento e peso das colunas	44
3.1.3.2	Pré-dimensionamento e peso das telhas	44
3.1.3.3	Pré-dimensionamento e peso das terças	46
3.1.3.4	Pré-dimensionamento dos contraventamentos	46
3.1.3.5	Pré-dimensionamento das montantes e diagonais	46
3.1.3.6	Pré-dimensionamento dos banzos	47
3.1.3.7	Peso da estrutura	47
3.1.4	Combinações para os estados limites últimos	48
3.1.4.1	Primeira combinação	48
3.1.4.2	Segunda combinação	48
3.1.4.3	Terceira combinação	48
3.1.4.4	Quarta combinação	49
3.1.4.5	Quinta combinação	49
3.1.4.6	Sexta combinação	49
3.1.4.7	Sétima combinação	49
3.1.4.8	Maiores cargas oriundas das combinações	50

3.1.5	Determinação dos esforços mecânicos via software Ftool	50
3.1.6	Dimensionamento das colunas	52
3.1.6.1	Verificação da esbeltez	52
3.1.6.2	Verificação da capacidade à compressão da alma	52
3.1.6.3	Verificação da capacidade à compressão da mesa	53
3.1.6.4	Cálculo da força axial de flambagem elástica	54
3.1.6.5	Força axial resistente de cálculo	55
3.2	DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO VIA MÉTODO SECTION GOLD.....	55
3.3	DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO VIA FMINCON	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5	CONCLUSÃO.....	64
5.1	TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE A	68
	APÊNDICE B	69
	ANEXO A	70
	ANEXO B	73
	ANEXO C	75
	ANEXO D	79
	ANEXO E	83

1 INTRODUÇÃO

A indústria de estruturas metálicas, amplamente difundida em potências como Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido há décadas (BNDES, 2012), apresenta crescimento expressivo no Brasil nos últimos anos (AÇO BRASIL, 2021). Esse aumento torna urgente a busca por métodos que reduzam o custo dessas estruturas.

Atualmente, os projetos de estruturas metálicas no Brasil seguem o dimensionamento proposto na ABNT NBR 8800:2008, sendo este probabilístico, ou seja, muitas equações foram determinadas de modo empírico para então determinarem equações que modelam o sistema, visto que não é possível prever exatamente todos os fatores que produzirão esforços na estrutura.

O dimensionamento segundo a NBR 8800 considera as forças de trabalho descritas na NBR 8681, bem como as forças devidas ao vento, que são estimadas segundo o que é proposto na NBR 6123. Leva-se em consideração o peso próprio da estrutura, estimado pelas equações clássicas da resistência dos materiais (Hibbleler, 2008). A partir dessas equações, é possível estimar a resistência mecânica dos elementos estruturais.

Este trabalho demonstra o dimensionamento proposto pela NBR 8800, NBR 8681 e NBR 6123 para determinar o elemento de coluna em viga W de um galpão metálico projetado para o município de Cascavel, no estado do Paraná. Utilizando as equações de resistência dos materiais, foi desenvolvido em ambiente MATLAB um algoritmo via método Section Gold que verifica a variação na carga crítica a partir da variação de cada uma das dimensões de seção da viga W. Por fim, foi desenvolvido no MATLAB, utilizando a função `Fmincon`, um algoritmo que efetua a verificação do ponto mínimo da função “massa” da viga, mantendo a resistência à carga crítica de projeto.

O método Section Gold é heurístico e busca o valor mínimo de uma função linear sem grande custo computacional, definindo um intervalo da função, comparando dois valores equidistantes dos limites da função considerando a proporção áurea ϕ ($\phi \cong 1,618$), comparando-os e, ao encontrar o menor dentre eles, torna-se um dos novos limites da função, reduzindo o intervalo de busca em uma fração proporção áurea a cada iteração. A razão de iteração é definida por ϕ , pois a cada iteração se mantém um dos limites da função, e, ao tomar o novo valor como o

outro limite, se mantém a proporção de ϕ a cada iteração (ARORA, 2004). A função F_{mincon} calcula o valor mínimo de uma função $f(x)$, podendo considerar restrições que mantenham sua linearidade (MATHWORKS, 2021).

Em vista disso, este trabalho compara a diferença nas dimensões da viga W escolhida no catálogo a partir das determinações da NBR 8800 com as menores dimensões que oferecem as forças axiais resistentes de cálculo, e, assim, foi possível avaliar se há possibilidade de reduzir de modo significativo o material utilizado para a construção de colunas de estruturas metálicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de uma metodologia alternativa baseada na técnica de otimização Section Gold para o dimensionamento de colunas metálicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para concluir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são desenvolvidos:

- i. Dimensionamento das colunas para uma estrutura metálica conforme ABNT NBR 8800:2008;
- ii. Desenvolvimento de código matemático no MATLAB para estabelecer as relações entre as dimensões de seção de vigas W com a resistência de carga crítica via método Section Gold.
- iii. Desenvolvimento de código para verificar a massa da coluna em ambiente MABLAB via F_{mincon} ;

1.2 JUSTIFICATIVA

A partir dos dados obtidos pelo algoritmo Section Gold e pelo algoritmo F_{mincon} , pode-se comparar as dimensões mínimas resistentes à carga crítica com o dimensionamento estabelecido pela NBR 8800. Esses dados permitem a avaliação do material empregado na construção das colunas de estruturas metálicas, permitindo

um dimensionamento mais preciso e possibilitando a economia de material de construção, e, com isso, um menor custo de projeto, maior rapidez na execução e melhor logística.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

É possível reduzir as dimensões das colunas das estruturas metálicas mantendo a resistência de carga crítica no projeto?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo foi iniciado em janeiro de 2021 e finalizado em novembro deste mesmo ano. Para o dimensionamento, foram consideradas as características do vento e de terreno em zona com baixa industrialização no município de Cascavel, no estado do Paraná.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo breve panorama histórico do aço no Brasil, alguns produtos e aplicações do aço, dados da produção siderúrgica brasileira nos últimos anos, as vantagens e desvantagens do aço industrial e os elementos que constituem galpões de estruturas metálicas. Referente aos métodos de cálculos, são apresentadas a determinação de forças devidas ao vento, forças devidas ao peso próprio, as combinações para os estados limites últimos, a determinação dos esforços mecânicos via Ftool e o dimensionamento das colunas. Por fim, é apresentado o método Section Gold.

2.1 PANORAMA HISTÓRICO DO AÇO NO BRASIL

A extração e manipulação do ferro em território nacional tem início relativamente tardio, acontecendo a partir da chegada da família real portuguesa ao Brasil. Aço Brasil (2021) cita que, entre o período da Independência do Brasil (1822) e a Proclamação da República (1889), a indústria do aço era formada por pequenas produções em forjarias.

Durante o início da república, em 1889, até a tomada do poder por Getúlio Vargas em 1930, a produção siderúrgica é gradualmente substituída de produções independentes para a indústria (AÇO BRASIL, 2021).

Apenas a partir do governo de Vargas que a siderurgia acelera seu desenvolvimento. Após a quebra da bolsa de Nova Iorque, a partir do desdobramento da economia cafeeira, há uma expansão industrial, consequentemente desenvolvendo o setor siderúrgico devido à necessidade de peças para maquinário e aço estrutural (AÇO BRASIL, 2021).

Em 1937, é decretado o Estado Novo, e Vargas prioriza o desenvolvimento da indústria de base brasileira. É reduzida a dependência do país em produtos siderúrgicos importados e várias indústrias siderúrgicas são criadas no país, como a Companhia Siderúrgica Nacional, em 1941, e a Companhia Vale do Rio Doce, em 1942 (AÇO BRASIL, 2021).

O período pós Segunda Guerra, entre 1946 e 1954, foi marcado por uma segunda onda industrial. Com a indústria progressivamente crescendo, o país passou a aumentar sua produção siderúrgica, suprimindo a demanda interna. Em 1956, com a

posse de Juscelino Kubitschek, para suprir as propostas de desenvolvimento e para a construção da nova capital, Brasília, o país carecia de mais aço (AÇO BRASIL, 2021).

Durante o governo militar, em 1966, cinco das maiores empresas produtoras de aço no país possuíam a maior parte do seu capital em poder da União (AÇO BRASIL, 2021). Esse cenário se alterou durante o governo Collor, que, em 1990, privatizou várias das estatais com a finalidade modernizar o setor e torná-lo mais competitivo. Em 1995, o setor já estava todo privatizado.

No período entre 2000 e 2008, a produção mundial de aço cresceu em 56%, enquanto a brasileira, 20%, ficando distante do crescimento mundial. Ainda assim, em 2007, a produção brasileira alcançou 33,8 milhões de toneladas, consolidando o Brasil como o maior produtor da América Latina e o sétimo maior produtor do mundo, produzindo e exportando o aço bruto, bem como vários produtos de origem siderúrgica (AÇO BRASIL, 2021).

2.2 PRODUTOS E APLICAÇÕES

Algumas aplicações do aço podem ser observadas em utilidades domésticas, transporte, construção civil, embalagens, recipientes, setor energético, agricultura e esculturas artísticas (AÇO BRASIL, 2021).

Observam-se as seguintes classificações do aço:

- i. Aços carbono: são aços com carbono em sua composição, com baixo teor de liga, de composição química definida em faixas amplas. São utilizados em peças de carro, canos, construção, enlatados e chapas metálicas, como demonstrado na Figura 1.

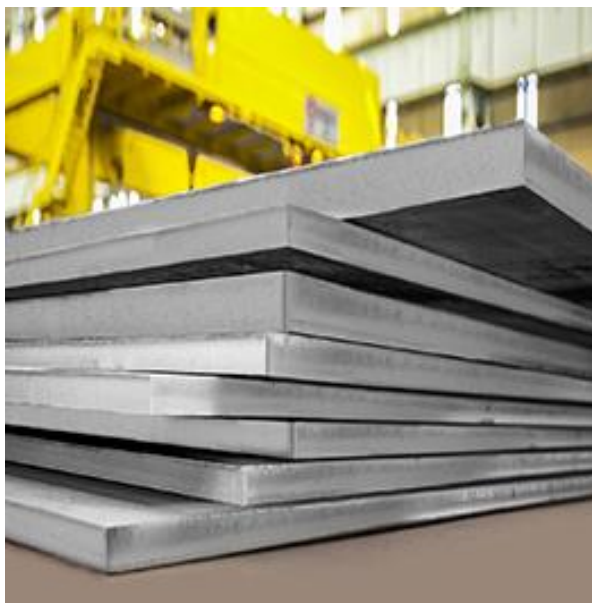


Figura 1: Chapas de aço carbono
(Fonte: GERDAU, 2021)

- ii. Aços ligados ou especiais: são aços ligados ou de alto carbono, de composição química definida em estreitas faixas para os elementos e especificações rígidas. Constitui componentes mecânicos com resistência a corrosão, moedas, tubulações e válvulas hidráulicas, como demonstrado na Figura 2.



Figura 2: Válvula hidráulica de aço liga
(Fonte: LAMARCK, 2021)

- iii. Aços ferramenta: são aços carbono ou de alta liga, destinados à fabricação de matrizes e ferramentas, como demonstrado na Figura 3, para trabalho a quente e a frio.



Figura 3: Peças de aço ferramenta.

(Fonte: AÇOS NOBRE, 2021)

- iv. Aços construção mecânica: são aços carbono e de baixa liga para forjaria, rolamentos, molas, eixos e peças usinadas. Exemplos de aços de construção mecânica vendidos pela Gerdau, como apresentado na Figura 4, são apresentados no ANEXO A. Sua utilização em larga escala está ligada à capacidade de produção siderúrgica no país.



Figura 4: Aço em estrutura metálica.

(Fonte: GERDAU, 2021)

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AÇO ESTRUTURAL

2.3.1 Desvantagens

Segundo Pinheiro (2005), entre as desvantagens de utilizar estruturas em aço estão:

- i. Limitação de execução em fábrica, devido ao transporte até sua montagem final;
- ii. Necessidade de tratamento das peças contra oxidação – devido à corrosão natural do ferro e do aço;
- iii. Necessidade de mão de obra e de equipamentos especializados para fabricação e montagem – devido à necessidade de precisão e da viabilidade que a industrialização do processo proporciona;
- iv. Fragilidade da estrutura quando exposta ao fogo – pois o aço se torna maleável em altas temperaturas e possui ponto de fusão relativamente baixo se comparado com o concreto armado (BELLEI 2003).

2.3.2 Vantagens

Pinheiro (2005) também destaca as vantagens do uso das estruturas metálicas:

- i. Elevada confiabilidade das dimensões e propriedades dos materiais – devido à mecanização dos processos de trabalho metalúrgicos;
- ii. Elevada resistência a vibrações e a choques – devido à elasticidade e à resistência do aço;
- iii. Facilidade no processo de limpeza na execução das obras – pois as peças são feitas em fábrica e os cortes no local deixam poucos resíduos e de fácil remoção comparado ao concreto armado, além de não necessitar de formas de madeira;
- iv. Possibilidade de desmontagem e remontagem em outro lugar – também devido à elasticidade e à resiliência do aço, além de o aço permitir retrabalho;
- v. Viabilidade de reaproveitamento do material – pois o aço é reciclável;

- vi. Elevada resistência estrutural, estruturas leves que possibilitam grandes vãos – devido à alta resistência a choques e à elasticidade do aço; este trabalho visa a reduzir ainda mais a massa da estrutura;
- vii. Elevada disponibilidade de perfis para as mais amplas necessidades do mercado, como terças, colunas, entre outros elementos de estruturas metálicas.

2.4 ELEMENTOS DE UM GALPÃO INDUSTRIAL

As estruturas metálicas se apresentam em várias classes: entre elas estão as estruturas de edifícios, estruturas de obras, estruturas de armazenamento e estruturas de galpões (GALVAMINAS 2021).

O galpão industrial é um tipo de construção feita em aço. Normalmente conta com um único pavimento, que abriga desde pequenas fábricas ou quadras esportivas até grandes complexos industriais. Os galpões em estruturas metálicas são empreendimentos mais leves, baratos e realizados em prazo mais curto em relação aos de concreto armado (GRUPO MB 2021).

Os galpões podem ser construídos usando estrutura espacial, estrutura em duas águas, estrutura em arco e estrutura em shed, apresentados na Figura 5.

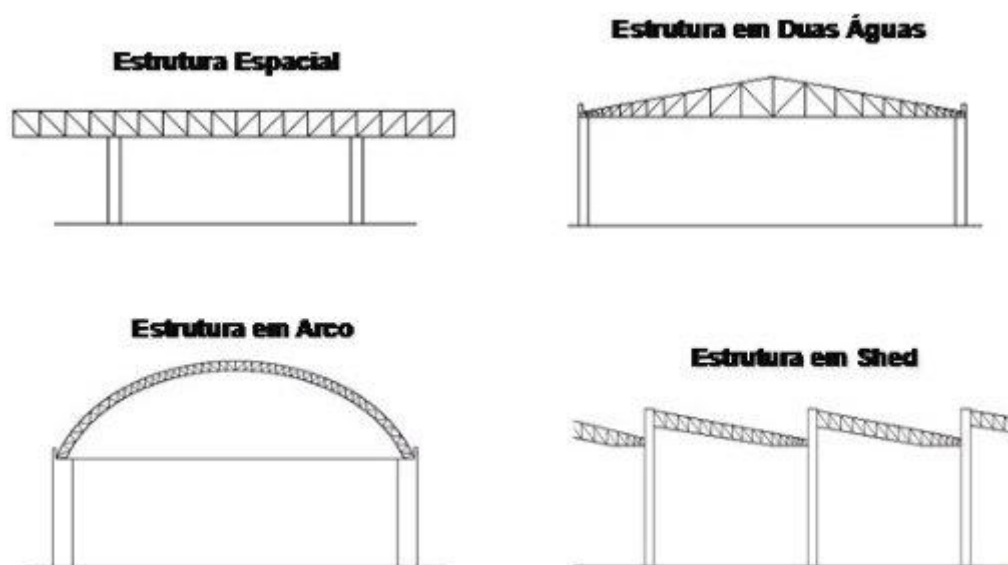


Figura 5: Tipos de galpões metálicos.

(Fonte: Maxton logística, 2021)

A estrutura em duas águas, utilizada para este trabalho, cobre grandes extensões de espaço fechado em um único pavimento, e é constituída de travessas, contraventamentos, colunas e terças (MAXTON LOGÍSTICA 2021).

2.4.1 Terças

Servem de apoio e de elemento estabilizante às telhas de cobertura. São apoiadas transversalmente nas tesouras. Fazem a transmissão da sobrecarga da cobertura e das ações do vento para os pórticos transversais, como demonstrado na Figura 6.



Figura 6: Terças metálicas.

(Fonte: MDL, 2021)

2.4.2 Travessas ou longarinas

São as vigas laterais. Possuem a função de transmitir as cargas para as colunas, assim como fazer o apoio do tapeamento lateral, e são demonstradas na Figura 7.

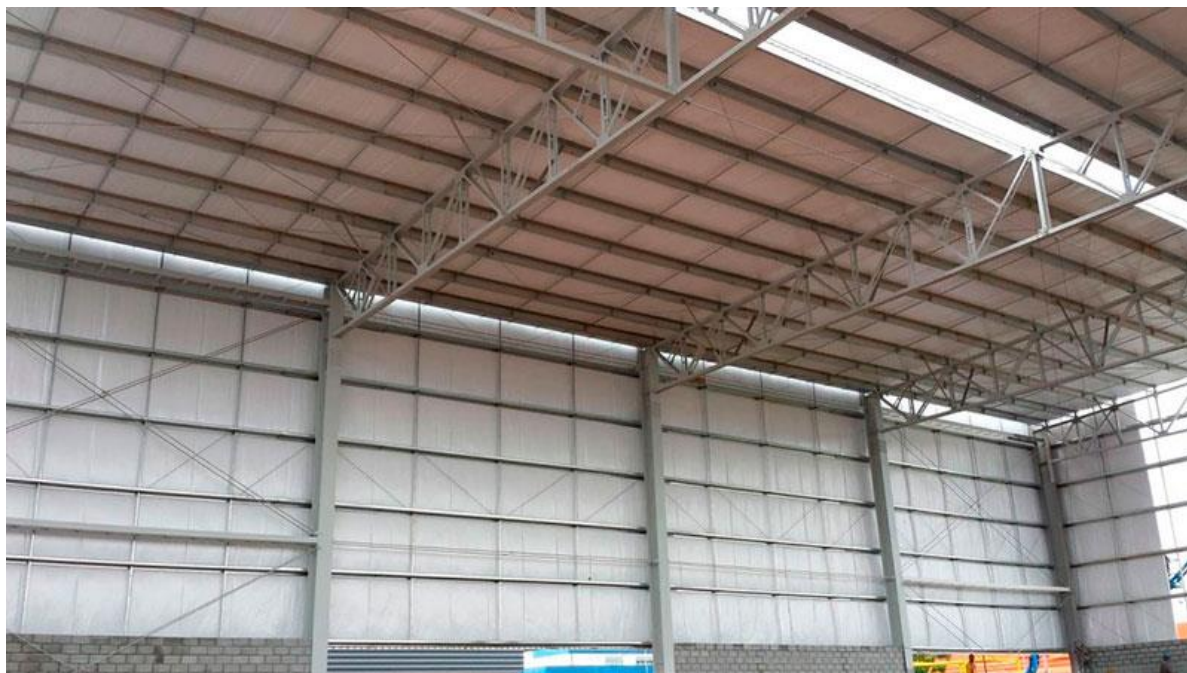


Figura 7: Estrutura metálica com travessas em evidência.

(Fonte: GAN COBERTURA INDUSTRIAL, 2021)

2.4.3 Contraventamentos

Executados com barras de aço, estabilizam a estrutura no sentido longitudinal e transmitem os esforços para a fundação. Geralmente possuem formato circular e são dispostos na forma de “X”, como demonstrado na Figura 8. Seus esforços de compressão podem ser desprezados.



Figura 8: Contraventamento em “X” em estrutura metálica.

(Fonte: Full estruturas, 2021)

2.4.4 Colunas

São os elementos estruturais que recebem e transmitem ao solo as cargas do resto da estrutura, demonstrados na Figura 9. É a parte mais robusta da estrutura metálica. Segundo Abbet (1957), é o elemento estrutural vertical que recebe os esforços diagonais da edificação, transferindo-os para as fundações. No Brasil, as colunas de galpões metálicos seguem o método de cálculo proposto na ABNT NBR 8800/2008, que será realizado neste trabalho e comparado ao método Section Gold.



Figura 9: Colunas de estruturas metálicas em viga W.

(Fonte: GALVAMINAS, 2021)

Para este trabalho de conclusão de curso, serão dimensionadas colunas em perfil W, conforme NBR 8800, assim como demonstrado na figura 10.

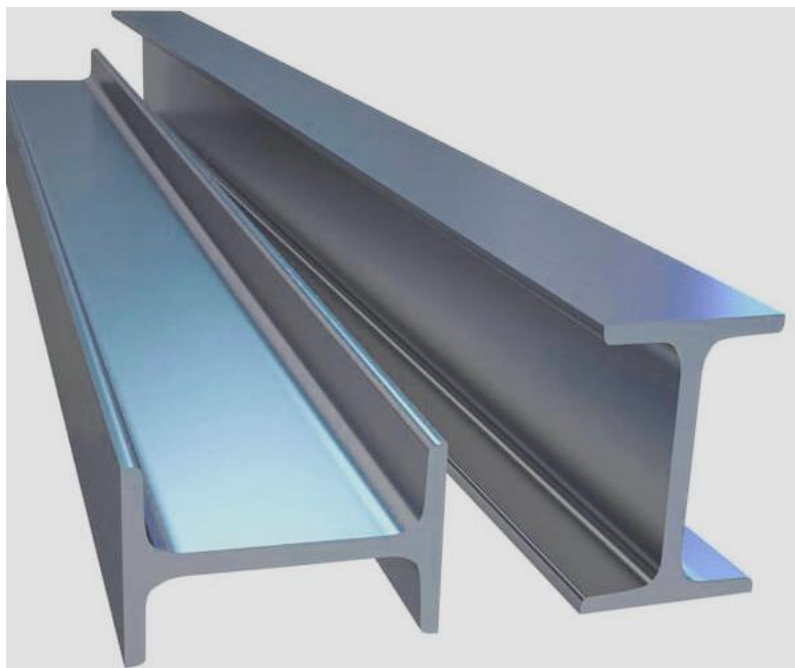


Figura 10: Perfil W de aço.

(Fonte: GALVAMINAS, 2021)

2.5 PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS CONFORME NBR 8000

Para seu dimensionamento, se faz necessário o levantamento das cargas devidas ao vento, das cargas devidas ao uso e à ocupação e das cargas devidas ao peso próprio da estrutura.

2.5.1 Determinação das cargas devidas ao vento em edificações

A determinação das cargas devidas ao vento em edificações é elaborada conforme NBR 6123/1989. Essa norma fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento para efeitos de cálculo de edificações.

2.5.2 Determinação das cargas devidas ao uso e à ocupação

Para a determinação das cargas devidas ao uso e à ocupação, considera-se os valores mínimos estipulados pelo item B.5 - Sobrecarga em coberturas, do anexo

B da NBR 8800/2008. Estima-se para coberturas comuns, na ausência de especificação mais rigorosa, uma sobrecarga característica mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$ em projeção horizontal.

A carga mínima sugerida pela norma 8800 deve ser acrescida de um valor característico em função do número de trabalhadores necessários para efetuar a manutenção do telhado.

2.5.3 Determinação das cargas devidas ao peso próprio da estrutura

A determinação das cargas devidas ao peso próprio da estrutura corresponde à ação da gravidade sobre os elementos estruturais do galpão. Esses carregamentos serão estimados em função dos valores fornecidos pelos fabricantes. Conhecendo as cargas permanentes e variáveis da estrutura, efetuam-se as combinações para os estados limites últimos. Para isso, será necessário realizar o pré-dimensionamento dos elementos estruturais do galpão.

2.5.3.1 Pré-dimensionamento das colunas

Bellei (2006), em seu livro sobre edifícios industriais em aço, recomenda para colunas de galpões sem ponte rolante com a seção constante um valor de altura do perfil de $H/20$ a $H/30$, sendo H a altura da coluna até o beiral. Será selecionado, a partir do catálogo de bitolas GERDAU encontrado no anexo A, um perfil W adequado.

2.5.3.2 Pré-dimensionamento das terças

Bellei (2006) comenta, como orientação inicial, a possibilidade de estabelecer uma relação entre a altura do perfil (d) e o vão da terça (L). Em geral, pode-se obedecer ao critério $L/40$ a $L/50$. Será selecionado, a partir do catálogo de bitolas GERDAU encontrado no anexo B, um perfil U adequado.

2.5.3.3 Pré-dimensionamento dos contraventamentos

Conforme o item 6.3 – Parafusos e barras rosqueadas, da pagina 76 da ABNT NBR8800, o valor mínimo indicado para uma barra rosqueada é de 12mm.

2.5.3.4 Pré-dimensionamento das montantes e diagonais

Conforme Pfeil (2009), usualmente são utilizadas duas cantoneiras de 2 polegadas para cada montante e diagonal.

2.5.3.5 Pré-dimensionamento dos banzos

Considerando que as diagonais e montantes de 2in são soldadas dentro dos banzos, é necessário que o perfil escolhido para o banzo possua ao menos duas vezes esse espaço por dentro.

2.5.4 Combinações para os estados limites últimos

Os estados limites de uma estrutura são aqueles a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção. São divididos em duas grandes classes, a saber: Estados limites últimos e Estados limites de serviço.

Nos estados limites últimos, pela sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção. Já nos estados limites de serviço, por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura. De acordo com o item 5.1.3.1 da NBR 8680, as combinações últimas normais são dadas pela seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{oj} F_{Qi,k} \right] \quad (2.1)$$

Sendo " $F_{Gi,k}$ " o valor característico das ações permanentes; " $F_{Q1,k}$ " o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação e " $\Psi_{0j}F_{Qi,k}$ " o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis. Os coeficientes de ponderação são dados pelas tabelas 1 e 2, a seguir.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b		Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
Normais	1,20		1,40	1,20	1,50	
Especiais ou de construção	1,00		1,20	1,10	1,30	
Excepcionais	1,00		1,00	1,00	1,00	

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

Fonte: Adaptado de NBR 8681/2003.

Tabela 2 - Valores fatores de combinação Ψ_0 e de redução Ψ_1 e Ψ_2 para as ações variáveis

Ações		γ_{f2}^a		
		Ψ_0	Ψ_1^d	Ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^{c)}	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 4.7.5.3.				
^b Edificações residenciais de acesso restrito.				
^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.				
^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar Ψ_1 igual a 1,0.				
^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para Ψ_2 o valor zero.				

Fonte: Adaptado de NBR 8681/2003

Posteriormente à determinação das combinações, selecionam-se as duas maiores cargas em valores absolutos para a sobressão e sucção. Essas cargas serão aplicadas no software Ftool.

2.5.5 Determinação dos esforços mecânicos via software Ftool

O Two-dimensional Frame Analysis Tool (Ftool) é um software gráfico-interativo de Engenharia Civil, desenvolvido na PUC-Rio, para auxiliar no ensino do comportamento estrutural de pórticos planos.

Neste trabalho de conclusão de curso, as forças encontradas no item 2.5.4 - Combinações para os estados limites últimos serão aplicadas em uma estrutura treliçada dentro do ambiente do software Ftool, conforme projeto em anexo. A partir dessa simulação, concebem-se dois gráficos de esforços mecânicos, a saber: um gráfico considerando a força de sobressão e um gráfico considerando a força de sucção. Os gráficos gerados serão utilizados para o dimensionamento das colunas.

2.5.6 Dimensionamento das colunas

O dimensionamento das colunas será realizado conforme anexo F da NBR 8800. Este relaciona as equações para o dimensionamento do esforço mecânico de flambagem local de barras axialmente comprimidas. Inicia-se verificando a esbeltez da coluna.

2.5.6.1 Verificação da esbeltez

A verificação da esbeltez é realizada conforme item 5.3.4 da NBR 8800. Essa limitação do índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado do perfil L e o raio de giração correspondente r , não deve ser superior a 200, conforme equação 2.2.

$$\frac{L_x}{r_x} < 200 \text{ e } \frac{L_y}{r_y} < 200 \quad (2.2)$$

sendo L o comprimento destravado e r o raio de giração correspondente. Posteriormente à verificação da esbeltez efetua-se a verificação da capacidade a compressão.

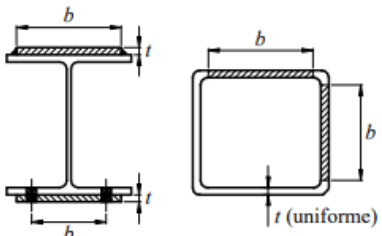
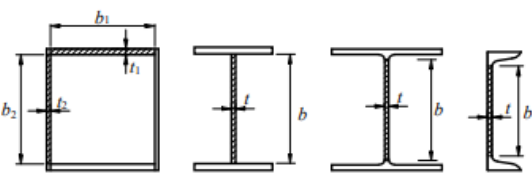
2.5.6.2 Verificação da capacidade a compressão

A verificação da capacidade a compressão é realizada conforme item F.1.2 da NBR 8800. As barras submetidas à força axial de compressão – nas quais todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (relações b/t) que não superam os valores de $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ dados na Tabela F.1 – têm o fator de redução total Q igual a 1,00. Já as barras submetidas à força axial de compressão – nas quais os elementos componentes da seção transversal possuem relações (relações b/t) maiores que os valores de $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ dados na Tabela F.1 (elementos esbeltos) – têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s * Q_a \quad (2.3)$$

sendo Q_s e Q_a fatores de redução que levam em conta a flambagem local dos elementos AL e AA, cujos valores devem ser determinados como mostrado em F.2 e F.3, da NBR 8800, respectivamente.

Tabela 3 - Fragmento da tabela F.1 - Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	- Mesas ou almas de seções tubulares retangulares - Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	- Almas de seções I, H ou U - Mesas ou almas de seção-caixão - Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptado de NBR 8800/2008

Posteriormente à verificação da capacidade a compressão, efetua-se o cálculo da Flambagem Elástica.

2.5.6.3 Cálculo da força axial de flambagem elástica

A força axial de flambagem elástica e o coeficiente de flambagem são determinados pelo anexo E da NBR 8800. Para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal, a força axial é dada por:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (2.4)$$

sendo " N_{ex} " a força axial para o eixo x , " E " o módulo de elasticidade do material, " I_x " o momento de inércia no eixo x , " K_x " o coeficiente de flambagem e " L_x " o comprimento

da coluna. Já para a flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (2.5)$$

sendo " N_{ey} " a força axial para o eixo y, " E " o módulo de elasticidade do material, " I_y " o momento de inércia no eixo y, " K_y " o coeficiente de flambagem e " L_y " o comprimento da coluna. O menor valor entre as forças axiais será utilizado para determinar a força axial resistente de cálculo.

2.5.6.4 Força axial resistente de cálculo

Para o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão, conforme item 5.3 da NBR 8800, deve-se atender à seguinte condição:

$$N_{c,sd} \leq N_{c,rd} \quad (2.6)$$

sendo $N_{c,sd}$ a força axial de compressão solicitante de cálculo e $N_{c,rd}$ a força axial de compressão resistente de cálculo, determinada conforme equação 2.7.

$$N_{c,rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.7)$$

sendo " χ " o fator de redução associado à resistência a compressão, " Q " o fator de redução total associado à flambagem local e " A_g " a área bruta da seção transversal da barra. Sucessivamente ao dimensionamento das colunas para uma estrutura metálica conforme ABNT NBR 8800:2008, efetua-se a otimização da coluna conforme técnica Section Gold.

2.6 OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS

A engenharia deve projetar sistemas eficientes e de baixo custo sem comprometer a integridade do produto (ARORA, 2004). A otimização utiliza o método científico para apoiar a tomada de decisões, determinando como projetar e operar um sistema de forma mais eficiente. Matematicamente, consiste em encontrar os mínimos ou máximos de uma função de diversas variáveis, e é necessário determinar quais variáveis podem otimizar o problema.

2.6.1 Conceitos de projeto ótimo

Os projetos convencionais são baseados na intuição do projetista, e, após a verificação dos critérios de performance, as alterações são realizadas com base na experiência, como demonstrado na Figura 11.

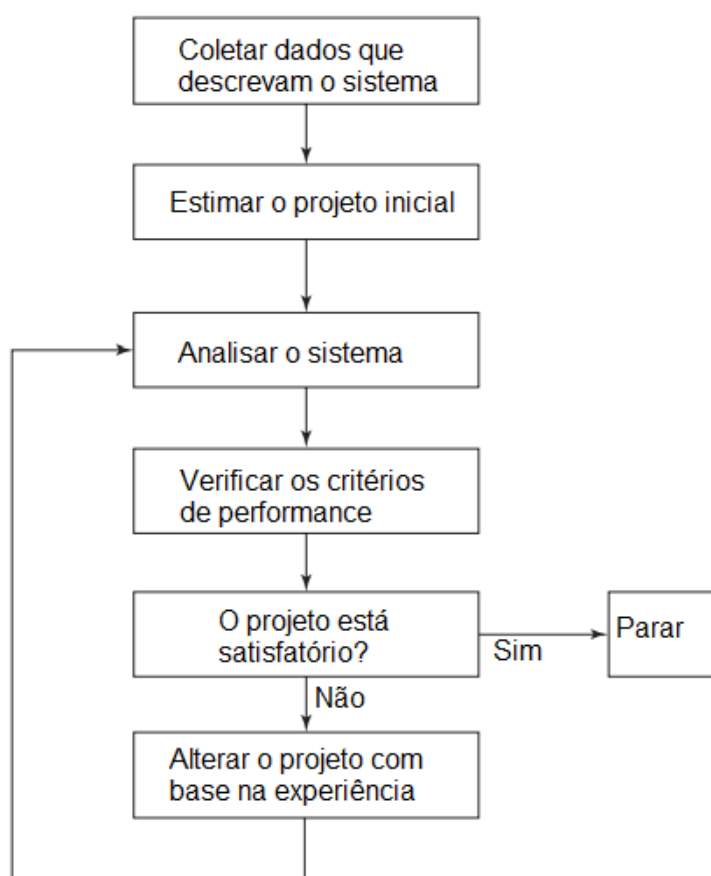


Figura 11: Processo de projeto convencional.

(Fonte: Adaptado de Arora, 2004)

Já os projetos otimizados fazem o projetista definir explicitamente um conjunto de variáveis, uma função objetiva a ser otimizada e as funções limitantes do sistema. Ao contrário dos projetos convencionais, busca-se o direcionamento e a precisão que os métodos de otimização oferecem, como demonstrado na Figura 12 (ARORA, 2004).

Essa formulação rigorosa irá proporcionar maior compreensão do problema e, conseqüentemente, uma correta escolha das soluções matemáticas. Para tal, é necessário definir quais variáveis é desejável minimizar ou maximizar. Neste trabalho, minimizam-se as dimensões de uma viga W , o que acarretará em uma massa menor, mantendo os critérios mínimos de carga.

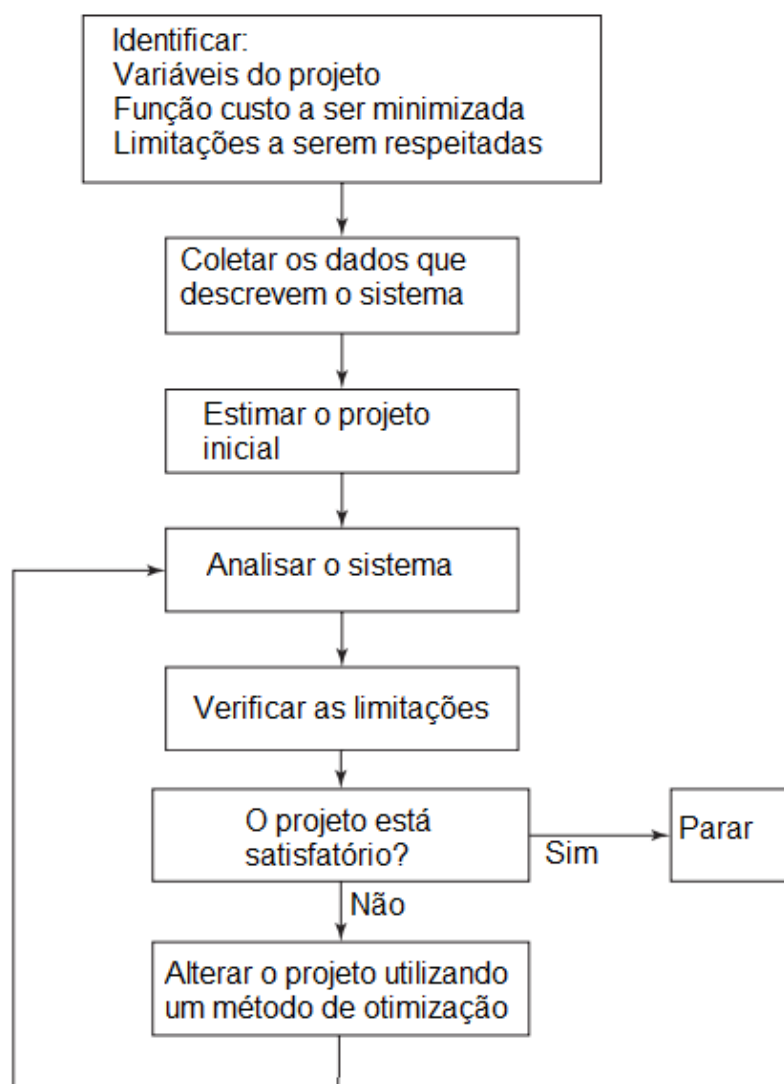


Figura 12: Processo de projeto otimizado.

(Fonte: Adaptado de Arora, 2004)

2.6.2 Definição de mínimo global e local

A otimização busca encontrar um ponto viável no projeto em que determinadas variáveis tenham um valor mínimo. Para encontrar otimizações no projeto é necessário definir as variáveis que se deseja reduzir até o menor valor possível, respeitando alguns critérios da função. Esse valor é considerado o valor mínimo. Em vista disso, é possível analisar o mínimo global de uma função $f(x)$ e os mínimos locais. Uma função $f(x)$ com n variáveis tem um mínimo global em x^* se:

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (2.8)$$

para todo x dentro da função. Se existir uma grande desigualdade entre todos os x e x^* , então x^* é chamado de “mínimo global forte”, o que significa que dentro do processo de otimização ainda é possível encontrar valores significativamente diferentes. De outro modo, é chamado de “mínimo global fraco” (ARORA, 2004). Mínimo local: Uma função $f(x)$ com n variáveis tem um mínimo local em x^* se a equação (2.8) for verdadeira dentro de uma pequena vizinhança N de x^* . Se existir uma grande desigualdade entre todos os x e x^* na vizinhança N , então x^* é chamado de “mínimo local forte”. De outro modo, é chamado de “mínimo local fraco”. Para encontrar os valores mínimos, deve-se antes verificar a linearidade das funções que definem o problema.

2.6.3 Métodos numéricos para busca unidimensional

Quando algumas ou todas as funções de um problema são não-lineares para a otimização do problema, ele é chamado de problema de programação não-linear (NLP). Os métodos numéricos para a otimização não-linear são necessários, pois os métodos analíticos para a resolução de alguns problemas são muito longos (ARORA, 2004). Nesse contexto, pode-se utilizar a técnica de busca por intervalos.

2.6.3.1 Técnica de busca por intervalos

Segundo Arora (2004), os métodos de busca por intervalos reduzem sucessivamente o intervalo de incerteza a um valor tolerável. São comparados valores da função em dois pontos sucessivos. Então, se a função em determinado ponto q for maior que no próximo ponto $q+1$, o ponto mínimo ainda não foi ultrapassado. Entretanto, se os valores da função começarem a aumentar, então o ponto mínimo já foi ultrapassado. Este trabalho utiliza dois métodos de busca por intervalo, o Fmicon e o método Section Gold.

2.6.3.2 Método Section Gold

O método Section Gold é uma técnica de busca por intervalos e é um dos métodos com menor custo computacional para a redução desses intervalos. O método encontra o valor da função em pontos predeterminados, compara com o grupo de mínimos na primeira fase e então converge para um ponto de mínimo na segunda fase. Esse método utiliza menos cálculos de função para alcançar o ponto mínimo se comparado com métodos similares. O número de cálculos é reduzido em ambas as fases, isto é, a fase inicial de agrupamento e a fase de redução de intervalo.

Em relação à fase de agrupamento de mínimo, nos métodos de busca por intervalos o valor de incremento δ é mantido fixo, o que pode ser ineficiente se δ for um número pequeno. Um procedimento alternativo é de variar o incremento a cada passo, por exemplo, multiplicando-o por uma constante $r > 1$. Apesar de ser um método rápido, o comprimento do intervalo de incerteza é aumentado. Para isso se pode utilizar o método Section Gold, em que r é selecionado a partir da proporção áurea, que é derivada de 1,618 em diversos modos. Uma delas é a sequência Fibonacci, definida por:

$$F_0 = 1; F_1 = 1; F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$$

Qualquer número para a sequência Fibonacci para $n > 1$ é obtido somando os dois números anteriores, e essa sequência tem a propriedade:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_n}{F_{n-1}} = 1,618 \quad (2.9)$$

Isto é, quanto maior n , a razão entre os números sucessivos F_n e F_{n-1} chega a um valor constante de 1,618 ou $\frac{\sqrt{5}+1}{2}$. Essa proporção áurea possui propriedades que são exploradas no método de busca unidimensional.

Em relação ao processo de agrupamento de mínimo, começando com $q = 0$, verifica-se o valor $f(\alpha)$ em $\alpha = \delta$, onde $\delta > 0$ é um número pequeno. É checado se o valor $f(\delta)$ é menor que o valor $f(0)$. Se for, incrementa-se 1,618 δ no passo. Desse modo, verifica-se o valor da função nos seguintes pontos:

$$\begin{aligned} q = 0; \alpha_0 &= \delta \\ q = 1; \alpha_1 &= \delta + 1,618 \delta = 2,618 \delta \\ q = 2; \alpha_2 &= 2,618 + 1,618(1,618 \delta) \end{aligned} \tag{2.10}$$

Em geral, é calculada a função nos pontos

$$\alpha_q = \sum_{j=0}^q \delta(1,618)^j \tag{2.11}$$

Em relação à fase de redução do intervalo de incerteza, o próximo passo é começar a reduzir o intervalo de incerteza calculando e comparando as funções em alguns pontos no intervalo de incerteza I . Assim que for conhecido o intervalo de incerteza, é possível utilizar o método Section Gold (ARORA, 2004), verificar as variações provocadas ao alterar as dimensões de secção da coluna e comparar os valores.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa é desenvolvida em três etapas descritas a seguir:

- i. Dimensionamento das colunas para uma estrutura metálica conforme ABNT NBR 8800:2008;
- ii. Desenvolvimento de código para minimizar a massa da coluna em ambiente MABLAB pelo método Section Gold;
- iii. Desenvolvimento de código para verificar a massa de coluna via Fmicon e estabelecer análise comparativa entre os resultados obtidos conforme NBR 8800.

3.1 DIMENSIONAMENTO DAS COLUNAS PARA UMA ESTRUTURA METÁLICA CONFORME ABNT NBR 8800:2008

Para comparar o método Section Gold com o método proposto pela ABNT:NBR 8800/2008, será considerado para a determinação das forças o projeto de um galpão para o município de Cascavel, no estado do Paraná, em terreno plano e área industrial. O galpão possui estrutura em duas águas, com vão entre colunas de 15 metros, conforme Figura 13, altura das colunas de 6 metros e largura de 54 metros, conforme anexo E, divididos por dez pórticos com distância de 6 metros entre si. O telhado possui inclinação de 10°. O galpão possui duas faces opostas igualmente permeáveis, sendo as outras faces impermeáveis. Com essas informações, é possível determinar as forças devidas ao vento seguindo a ABNT:NBR 6123, a força devida ao peso próprio da estrutura, as combinações para os estados limites últimos seguindo a ABNT:NBR 8681, os esforços mecânicos via software Ftool, e, por fim, o dimensionamento das colunas seguindo a ABNT:NBR 8800.

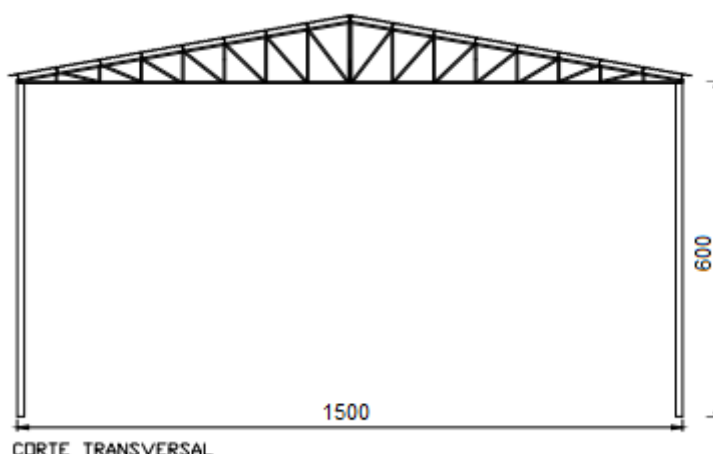


Figura 13: Corte transversal do galpão.

(Fonte: Adaptado via AutoCAD)

3.1.1 Determinação das cargas devidas ao vento

A determinação das forças devidas ao vento foi realizada utilizando o software VisualVentos, desenvolvido pela Universidade de Passo Fundo e que segue os procedimentos de cálculo segundo a ABNT:NBR 6123. Os parâmetros de entrada no software quanto às dimensões foram: fachada (b)=15, comprimento (a)=54, altura do pé direito (h)=6, inclinação do telhado (β)=10 e distância entre pórticos (p)=6. O v_0 para a cidade de Cascavel pode ser verificado na Figura 14, e foi considerado 47m/s. O fator topográfico é “plano”, categoria de terreno III, classe C, índice S3 grupo 3. O coeficiente de pressão interna considerou duas aberturas igualmente permeáveis, as outras impermeáveis.

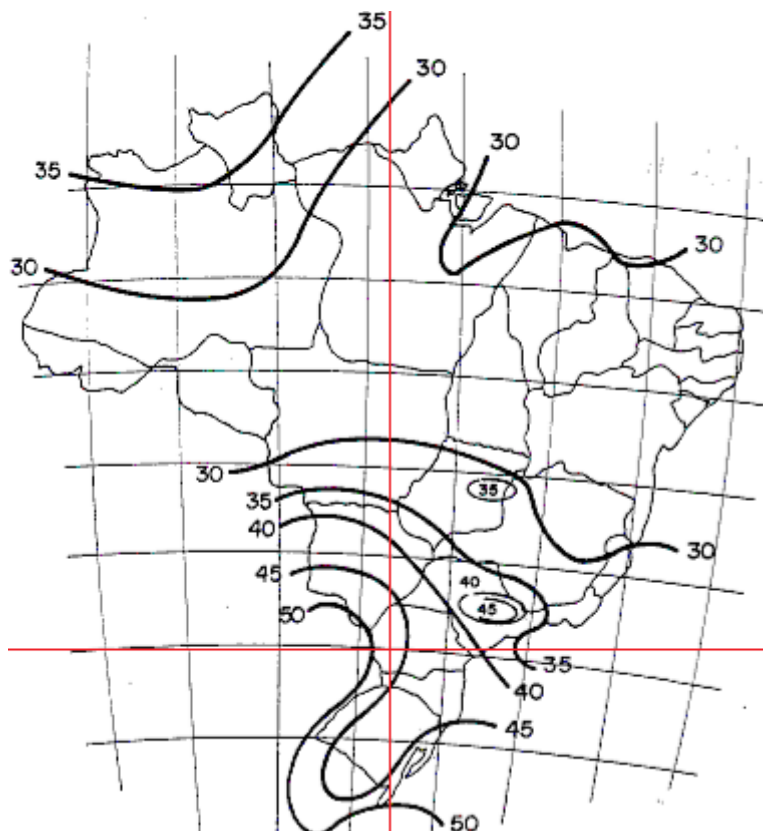


Figura 14: Análise das isoplethas de vento.

(Fonte: Adaptado de NBR 8686, 1988)

O relatório completo gerado pelo software está no ANEXO C e apresenta que o maior esforço de tração devido ao vento é de $6,75\text{kN/m}$ e o maior esforço de compressão devido ao vento é de $1,56\text{kN/m}$, demonstrados na Figura 15. Esses valores se adicionam às cargas devidas ao peso próprio da estrutura.

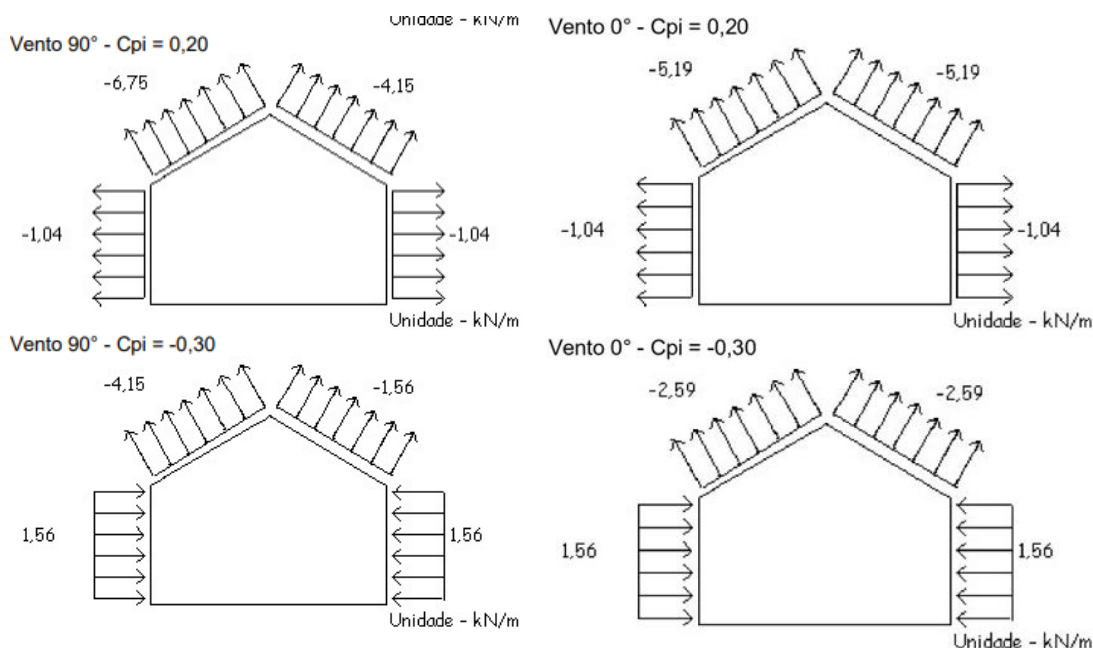


Figura 15: Cargas devidas ao vento.

(Fonte: Adaptado via VisualVentos)

3.1.2 Determinação das cargas devidas ao uso e à ocupação

Para a determinação das cargas devidas ao uso e à ocupação ($F_{Qi,k}$) foi considerada uma sobrecarga característica mínima de 0,25 kN/m² em projeção horizontal e a carga de quatro trabalhadores, cada um pesando 1kN.

O peso linearmente distribuído sobre o pórtico por estes trabalhadores será dado pela divisão da soma de seus pesos pela distância entre tesouras:

$$P = \frac{4 \cdot 1 \text{ kN}}{6} = 0,66 \text{ kN/m} \quad (3.1)$$

O peso linearmente distribuído sobre o pórtico devido à sobrecarga característica será dada pela multiplicação da carga por área pela distância entre tesouras:

$$P = 0,25 \text{ kN/m}^2 = 1,50 \text{ kN/m} \quad (3.2)$$

A carga acidental $F_{Qi,k}$ será dada pelo somatório das equações 3.1 e 3.2:

$$F_{Q_{i,k}} = 0,66kN/m + 1,50kN/m = 2,16kN/m \quad (3.3)$$

3.1.3 Determinação das cargas devidas ao peso próprio da estrutura

Para verificar as cargas devidas ao peso próprio da estrutura, é necessário ter uma aproximação do peso dos elementos estruturais, por isso, é primeiro realizado um pré-dimensionamento desses elementos.

3.1.3.1 Pré-dimensionamento e peso das colunas

Verificando a relação encontrada no item 2.5.3.1:

$$d = \frac{H}{20} = \frac{6000m}{20} = 300mm \quad (3.4)$$

Então se verifica na tabela de bitolas da GERDAU apresentada no ANEXO A os perfis disponíveis no mercado, e se adota o perfil W 310 x 38,7kg/m no pré-dimensionamento. Cada pórtico possui duas colunas, cada coluna possui 6m e cada metro de coluna tem 38,7kg de massa. Logo, o peso das colunas por pórtico é dado por:

$$m = 2 * 6m * 38,7kg/m = 464,4kg \quad (3.5)$$

3.1.3.2 Pré-dimensionamento e peso das telhas

É adotada a telha de 0,5mm de espessura a partir do catálogo da Gerdau expresso na Figura 16. A telha selecionada é demonstrada na Figura 17.

Tabela de Cargas Admissíveis (kg/m²) - Telhas com Zn

Esp. (mm)	Peso (kg/m ²)	Nº de apoios	Distância entre Apoios (mm)									
			1500		1750		2000		2250		2500	
			F	C	F	C	F	C	F	C	F	C
0,43	4,66	2	65	41	41	25	27	17	19	13	14	8
		3	98	97	71	61	55	41	43	29	34	21
		4	122	77	78	49	52	33	36	22	25	16
0,50	5,42	2	78	48	48	30	32	20	22	13	17	10
		3	113	112	83	71	64	47	50	33	38	24
		4	141	89	90	56	60	37	43	26	31	20
0,65	7,05	2	97	61	61	38	41	26	29	17	21	13
		3	144	144	108	90	81	61	64	42	49	31
		4	181	115	115	72	77	48	53	34	39	25
0,80	8,67	2	117	74	74	46	49	31	34	22	26	15
		3	175	173	128	109	98	73	78	51	60	37
		4	218	138	140	87	93	58	66	41	47	30

F- Fechamento C - Cobertura

Figura 16: Telhas metálicas trapezoidais GERDAU.

(Fonte: GERDAU, 2021)

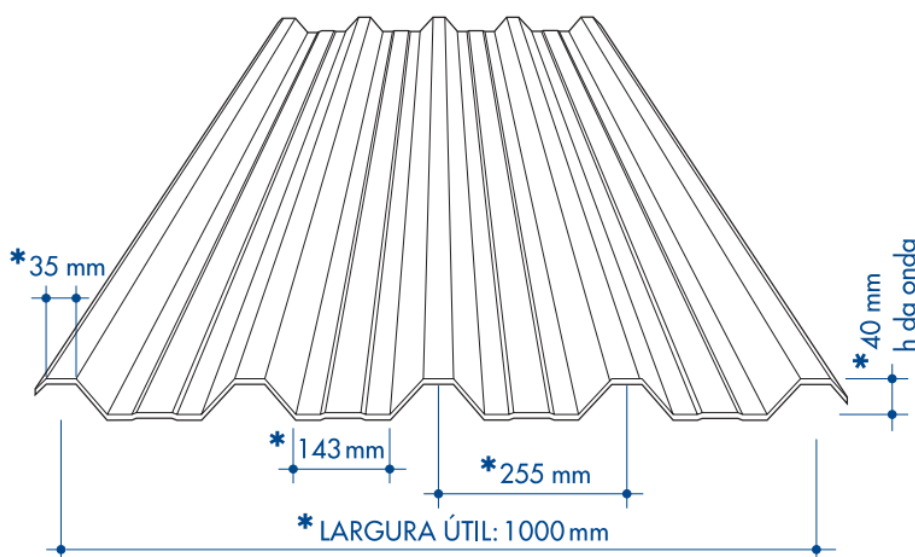


Figura 17: Telha metálica trapezoidal GERDAU.

(Fonte: GERDAU, 2021)

Verifica-se que o peso das telhas é de 5,42kg/m². O peso linearmente distribuído das telhas será dado pela multiplicação do peso/área pela distância entre pórticos:

$$m = 5,42 \text{ kg/m}^2 * 6 \text{ m} = 32,52 \text{ kg/m} \quad (3.6)$$

3.1.3.3 Pré-dimensionamento e peso das terças

De acordo com a relação encontrada no item 2.5.3.2:

$$d = \frac{L}{40} = \frac{6000m}{40} = 150mm \quad (3.7)$$

Verificando a tabela de bitolas de GERDAU apresentada no anexo C, é selecionado o perfil U 152,4 x 15,62kg/m.

Considerando a largura útil da telha escolhida sendo de 1000m, como visto na Figura 17, verifica-se que a distância das terças deve ser inferior. Por isso, serão utilizadas 9 terças em cada água do telhado.

Cada pórtico possui 18 terças, cada terça possui 6m de largura e cada metro de terça tem 15,62kg de massa. Logo, o peso das terças por pórtico é dado por:

$$m = 18 * 6m * 15,62kg/m = 1686,96kg \quad (3.8)$$

3.1.3.4 Pré-dimensionamento dos contraventamentos

Verificando a tabela de bitolas de GERDAU apresentada no anexo C, é escolhida a barra redonda de ½in x 0,99kg/m.

Cada pórtico tem 36 barras de contraventamento, cada barra tem 6,07m e cada metro de barra possui 0,99kg de massa. Logo, o peso dos contraventamentos por pórtico é dado por:

$$m = 36 * 6,07m * 0,99kg/m = 215,29kg \quad (3.9)$$

3.1.3.5 Pré-dimensionamento das montantes e diagonais

Verificando a tabela de bitolas de GERDAU apresentada no anexo C, é selecionada a cantoneira de 2in x 4,74kg/m.

O menor dos montantes tem largura de 0,2m e o maior tem largura de 1,32m. Com isso, os montantes têm em média 0,76. Cada pórtico tem 36 montantes e cada metro de montante pesa 4,74kg. Logo, o peso dos montantes por pórtico é dado por:

$$m = 0,76m * 36 * 4,74kg/m = 129,68kg \quad (3.10)$$

A menor das diagonais tem 0,96m e a maior tem 1,51m. Com isso, as diagonais têm em média 1,235m. Cada pórtico tem 32 diagonais e cada metro de diagonal pesa 4,74kg. Logo, o peso das diagonais por pórtico é dado por:

$$m = 0,96m * 32 * 4,74kg/m = 187,32kg \quad (3.11)$$

3.1.3.6 Pré-dimensionamento dos banzos

Verificando a tabela de bitolas de GERDAU apresentada no anexo C, é selecionado o perfil U de 6in x 12,20kg/m.

Cada pórtico possui dois banzos superiores e dois banzos inferiores. O banzo superior tem 7,58m de largura, enquanto o banzo inferior tem 7,5m. Cada metro de banzo possui 12,2kg de massa. Logo, o peso dos banzos é dado por:

$$m = (2 * 7,55m + 2 * 7,5m) * 12,2kg/m = 224,39kg \quad (3.12)$$

3.1.3.7 Peso da estrutura

O peso dos elementos por pórtico é a soma do peso de colunas (3.5), telhas (3.6), terças (3.8), diagonais (3.9), montantes (3.10), contraventamentos (3.11) e banzos (3.12). O peso sem as telhas é dado por:

$$\begin{aligned} m &= 464,4kg + 1686,96kg + 192,29kg + 129,68kg + 187,32kg + 224,39kg \\ &= 2885,04kg \end{aligned} \quad (3.13)$$

O peso linearmente distribuído por pórtico será dado pela divisão do peso dos elementos pela distância entre colunas, e é dado por:

$$m = \frac{2885,04kg}{15m} = 192,336kg/m \quad (3.14)$$

Considerando agora o peso das telhas, o peso linear por pórtico é dado por:

$$m = 192,336 \text{ kg/m} + 32,52 \text{ kg/m} = 224,856 \text{ kg/m} \quad (3.15)$$

Por fim, para encontrar a carga devida ao peso da estrutura, deve-se multiplicar o peso por pórtico (3.15) pela aceleração gravitacional.

$$P = 224,856 \text{ kg/m} * 9,807 \text{ m/s}^2 \cong 2205 \text{ N/m} \cong 2,2 \text{ kN/m} \quad (3.16)$$

3.1.4 Combinações para os estados limites últimos

Os estados limites últimos foram determinados em sete combinações, considerando as situações mais desfavoráveis à estrutura.

3.1.4.1 Primeira combinação

Considerando ação desfavorável do vento de pressão como carga principal e ação da carga acidental como secundária:

$$\begin{aligned} Fd1 &= (1,25 * 2,2 \text{ kN/m}) + (1,40 * 1,56 \text{ kN/m}) + (1,50 * 0,8 \\ &\quad * 2,16 \text{ kN/m}) = 7,526 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.1.4.2 Segunda combinação

Considerando ação favorável do vento de sucção como carga principal e ação da carga acidental como secundária:

$$\begin{aligned} Fd2 &= (1,0 * 2,2 \text{ kN/m}) + (1,40 * -6,75 \text{ kN/m}) + (1,50 * 0,8 \\ &\quad * 2,16 \text{ kN/m}) = -4,658 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.1.4.3 Terceira combinação

Considerando ação desfavorável do vento de pressão como carga secundária e ação da carga acidental como principal:

$$Fd3 = (1,25 * 2,2kN/m) + (1,50 * 2,16 kN/m) + (1,40 * 0,6 * 1,56kN/m) = 7,3 kN/m \quad (3.19)$$

3.1.4.4 Quarta combinação

Considerando ação favorável do vento de sucção como carga secundária e ação da carga acidental como primária:

$$Fd4 = (1,0 * 2,2kN/m) + (1,50 * 2,16 kN/m) + (1,40 * 0,6 - 6,75kN/m) = 0,47 kN/m \quad (3.20)$$

3.1.4.5 Quinta combinação

Considerando ação desfavorável do vento de pressão como carga principal:

$$Fd5 = (1,25 * 2,2kN/m) + (1,40 * 1,56kN/m) = 4,934 kN/m \quad (3.21)$$

3.1.4.6 Sexta combinação

Considerando ação favorável do vento de sucção como carga principal:

$$Fd6 = (1,0 * 2,2kN/m) + (1,40 * -6,75kN/m) = -7,25 kN/m \quad (3.22)$$

3.1.4.7 Sétima combinação

Considerando ação da carga acidental como primária:

$$Fd7 = (1,25 * 2,2kN/m) + (1,50 * 2,16 kN/m) = 5,99 kN/m \quad (3.23)$$

3.1.4.8 Maiores cargas oriundas das combinações

Verifica-se que a combinação que oferece o maior esforço de compressão é a do item 3.1.4.1, sendo 7,526kN/m, enquanto a combinação que oferece o maior esforço de tração é a do item 3.1.4.6, sendo 7,25kN/m. Esses esforços foram aplicados no software Ftool para análise dos esforços em cada elemento, especialmente nas colunas.

3.1.5 Determinação dos esforços mecânicos via software Ftool

O pórtico do galpão foi simulado no software Ftool considerando os maiores esforços decorrentes das combinações últimas normais, como visto no item 3.1.4.8, sendo realizado em duas etapas: uma para o maior esforço de tração, demonstrada na Figura 18, e a outra para o maior esforço de compressão, demonstrada na Figura 19.

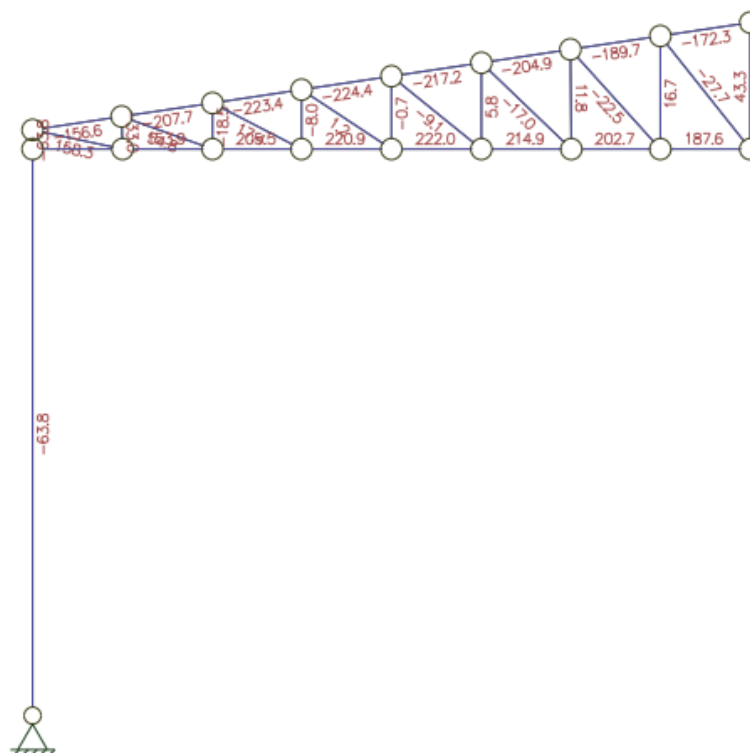


Figura 18: Esforços mecânicos no pórtico para carga de compressão, em kN.

(Fonte: Adaptado via Ftool)

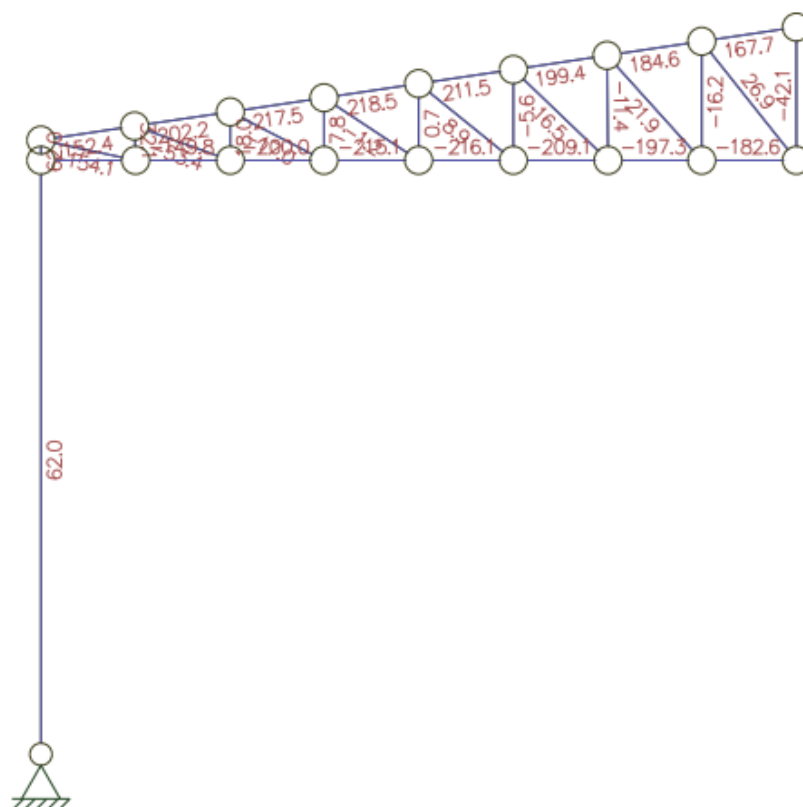


Figura 19: Esforços mecânicos no pórtico para carga de tração, em kN.

(Fonte: Adaptado via Ftool)

Verifica-se que o carregamento de compressão em cada pilar é de 63,8kN, enquanto o carregamento de tração em cada pilar corresponde a 62,0kN. O valor de 63,8kN será utilizado posteriormente no software MATLAB para minimizar a viga.

3.1.6 Dimensionamento das colunas

No pré-dimensionamento realizado no item 3.1.3.1 foi adotado o perfil W310x38,7 para os pilares do galpão. Conforme o anexo F da NBR 8800, é necessário verificar alguns fatores para definir se o perfil está suficientemente dimensionado.

3.1.6.1 Verificação da esbeltez

Para o perfil W310x38,7, conforme item 5.3.4 da NBR 8800, a verificação da esbeltez é dada por:

$$\frac{L_x}{r_x} = \frac{600cm}{13,14cm} = 45,66 < 200 \quad (3.24)$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \frac{600cm}{3,82cm} = 157,07 < 200 \quad (3.25)$$

Como ambos os valores são inferiores a 200, verifica-se que o perfil W310x38,7 possui esbeltez adequada.

3.1.6.2 Verificação da capacidade à compressão da alma

Para o perfil W310x38,7, conforme item F.1.2 da NBR 8800, para a verificação da capacidade à compressão da alma, primeiro se verifica a relação entre:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{271}{5,8} = 46,72 \quad (3.26)$$

$$1,49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 * \sqrt{\frac{200 * 10^9}{345 * 10^6}} = 35,87 \quad (3.27)$$

Como (3.26) apresentou resultado maior que (3.27), deve-se calcular o fator de redução Q_a . Primeiramente, é necessário calcular a largura efetiva (b_{efet}).

O cálculo da largura efetiva dos elementos AA é dado por:

$$b_{efet} = 1,92 * 5,8 * \sqrt{\frac{200 * 10^9}{345 * 10^6}} * \left[1 - \frac{0,34}{\frac{271}{5,8}} * \sqrt{\frac{200 * 10^9}{345 * 10^6}} \right] = 221,15mm \quad (3.28)$$

Como $b_{efet} \leq b$, ou seja, $221,15 < 271$, pode-se calcular a área efetiva da seção transversal (A_{efet}).

O cálculo da área efetiva A_{ef} da seção transversal é dado por:

$$A_{efet} = 4970 - (271 - 221,15) * 5,8 = 4680,87mm^2 \quad (3.29)$$

Com o valor de A_{efet} , pode-se calcular o fator de redução Q_a , que é dado por:

$$Q_a = \frac{A_{efet}}{A_g} = \frac{4690,87mm^2}{4970mm^2} = 0,94182 \quad (3.30)$$

Após a verificação da capacidade à compressão da alma, verifica-se a capacidade à compressão da mesa.

3.1.6.3 Verificação da capacidade à compressão da mesa

Para o perfil W310x38,7, para a verificação da capacidade à compressão da mesa, primeiro se verifica a relação entre:

$$\frac{b_f}{t_f} = \frac{165/2}{9,7} = 8,51 \quad (3.31)$$

$$0,56 * \sqrt{\frac{200 * 10^9}{345 * 10^6}} = 13,48 \quad (3.32)$$

Como (3.31) apresentou resultado inferior a (3.32), não será necessário calcular o fator de redução Q_s (considerando-o como sendo 1). Assim sendo, o fator de redução total Q é dado por:

$$Q = Q_a * Q_s = 0,94 * 1 = 0,94 \quad (3.33)$$

3.1.6.4 Cálculo da força axial de flambagem elástica

A flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal, a força axial é dada por:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 8581 * 10^{-8}}{(1 * 6)^2} = 4705,05kN \quad (3.34)$$

A flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal é dada por:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * 727 * 10^{-8}}{(1 * 6)^2} = 398,62kN \quad (3.35)$$

A força axial de flambagem elástica do perfil selecionado é a menor entre os três eixos, no caso, $N_e = N_{ey} = 398,62kN$.

3.1.6.5 Força axial resistente de cálculo

Para o dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão, verifica-se a relação entre a força axial de compressão solicitante de cálculo ($N_{c,sd}$), determinada no item 3.1.5, e a seguinte equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{0,217 * 0,94 * 4970 * 10^{-6} * 345 * 10^6}{1,1} = 317,95kN \quad (3.36)$$

Como $N_{c,Rd} \leq 63,8kN$, o perfil W200x31,3 é adequado para o elemento da coluna. Esse perfil será utilizado como base para a otimização e comparação de resultados, conforme método Section Gold.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO VIA MÉTODO SECTION GOLD

Utilizando-se do software MATLAB, desenvolve-se o ambiente computacional, através de algoritmos e códigos matemáticos. A técnica Section Gold foi aplicada em quatro etapas, cada qual para uma dimensão da viga W a ser variada, sendo elas: comprimento da mesa (bf), comprimento da alma (d'), largura da mesa (tf) e largura da alma (tw), e sua influência da resistência axial à carga de flambagem no eixo y, sendo este o eixo em vigas W que oferece menor resistência, em conformidade com as fórmulas clássicas da resistência dos materiais. Cada valor que é demonstrado possui razão $\phi' = 0,618$. A escolha deste número deve-se à seguinte relação:



Figura 20: Segmento áureo
(Fonte: FRANCISCO)

Na Figura 20, toma-se o comprimento do segmento menor, CB, como 1 unidade e o comprimento do maior, AC, como x unidades. Sendo a razão entre x e 1 é a mesma que entre x+1 (comprimento da linha AB) e x, então a linha é dividida na razão extrema e média, em outras palavras, o ponto C divide o segmento de modo que, assim como

o segmento todo está para maior parte, a maior parte está para a menor parte. Logo obtemos equação (3.37) da definição de razão extrema e média, assim sendo possível solucionar e determinar o valor de x , a Razão Áurea (FRANCISCO).

$$\frac{x}{1} = \frac{x+1}{x} \quad (3.37)$$

Multiplicando os dois lados da equação (3.37) por x , obtem-se $x^2 = x + 1$, que equivale à equação quadrática:

$$x^2 - x - 1 = 0 \quad (3.38)$$

Assim, obtém-se uma equação de 2º grau, de coeficientes $a = 1$, $b = -1$ e $c = 1$. O discriminante da equação (3.38) é dado por:

$$\Delta = b^2 - 4ac = (-1)^2 - 4(1)(-1) = 1 + 4 = 5 \quad (3.39)$$

Aplicando o discriminante na fórmula de Baskara:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2} \quad (3.40)$$

Portanto, da resolução da equação (3.40), obtém-se as duas soluções (3.41) e (3.42).

$$x_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad (3.41)$$

$$x_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \quad (3.42)$$

A solução positiva $\frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1,6180339887 \dots$ dá o valor da Razão Áurea. Verifica-se que ϕ é irracional, sendo metade da soma de 1 com a raiz quadrada de 5. Denota-se a solução negativa por ϕ' (FRANCISCO).

Os limites de cada intervalo foram definidos a partir dos catálogos da Gerdau presentes no ANEXO A e ANEXO B, considerando os menores e maiores valores para cada uma das variáveis neles encontrados. A partir desses dados, determinou-se quais variáveis exercem maior influência sobre a resistência axial à carga de flambagem, e foi desenvolvido algoritmo utilizando a função Fmicon.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO MATEMÁTICO DE OTIMIZAÇÃO VIA FMINCON

O software MATLAB oferece a ferramenta Fmicon, que permite estimar o valor mínimo de uma função $f(x)$ linear alterando os valores de duas variáveis, e estabelecendo restrições. Com intuito de minimizar a massa da viga W, mantendo a resistência mínima à carga de flambagem nos eixos x e y, bem como a resistência ao escoamento, determinou-se no algoritmo as quatro variáveis a serem minimizadas: comprimento da alma (h), espessura da alma (tw), comprimento da mesa (tf) e espessura da mesa (bf). Realizou-se o equacionamento da influência dessas variáveis em fatores como momento de inércia, resistência à carga crítica, área de seção e peso do perfil. A função a ser minimizada foi o peso do perfil, mantendo as restrições ao limite de escoamento mínimo e resistência à carga crítica nos eixos x e y. Como o algoritmo trabalha com apenas duas variáveis por vez, determinou-se via algoritmo Section Gold qual par de variáveis seria minimizado primeiro, para então minimizar o segundo par.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados foram gerados por códigos matemáticos desenvolvidos no ambiente do software MATLAB (versão R2017b), e executados em um computador com processador Intel i7 4790k (4,00 GHz) e memória RAM de 16,00 GB. O perfil selecionado no item 3.1.6, W310x38,7, de dimensões h (comprimento da alma) = 291mm, t_w (espessura da alma) = 5,8mm, t_f (espessura da mesa) = 9,7mm e b_f (comprimento da mesa) = 165mm, foi utilizado nos algoritmos como parâmetro inicial para as iterações. Variando os parâmetros de seção da viga W, observam-se os seguintes resultados:

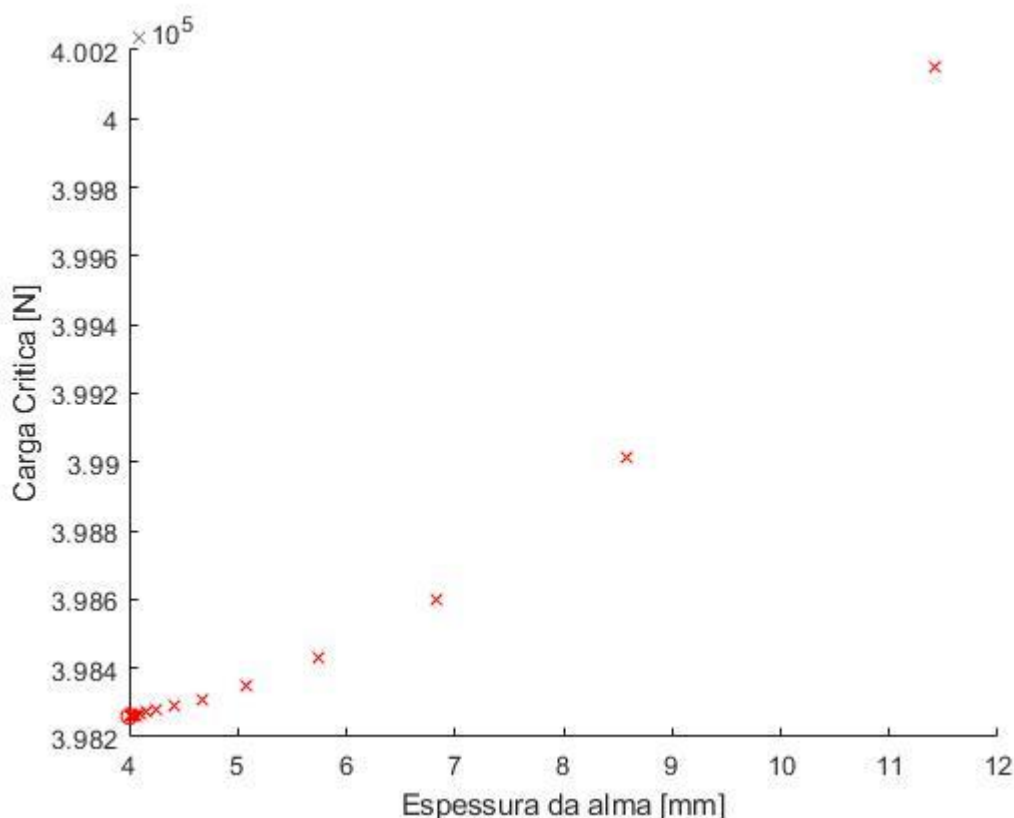


Figura 21: Influência da espessura da alma sobre a carga crítica em viga W.

(Fonte: Elaborado pelo autor utilizando Section Gold em MATLAB)

A Figura 21 demonstra que, ao aumentar a espessura da alma (t_w), mantendo o comprimento da mesa (b_f), comprimento da alma (h) e a espessura da mesa constantes, a carga crítica resistente aumenta exponencialmente, entretanto, os valores de carga crítica nos observados são próximos.

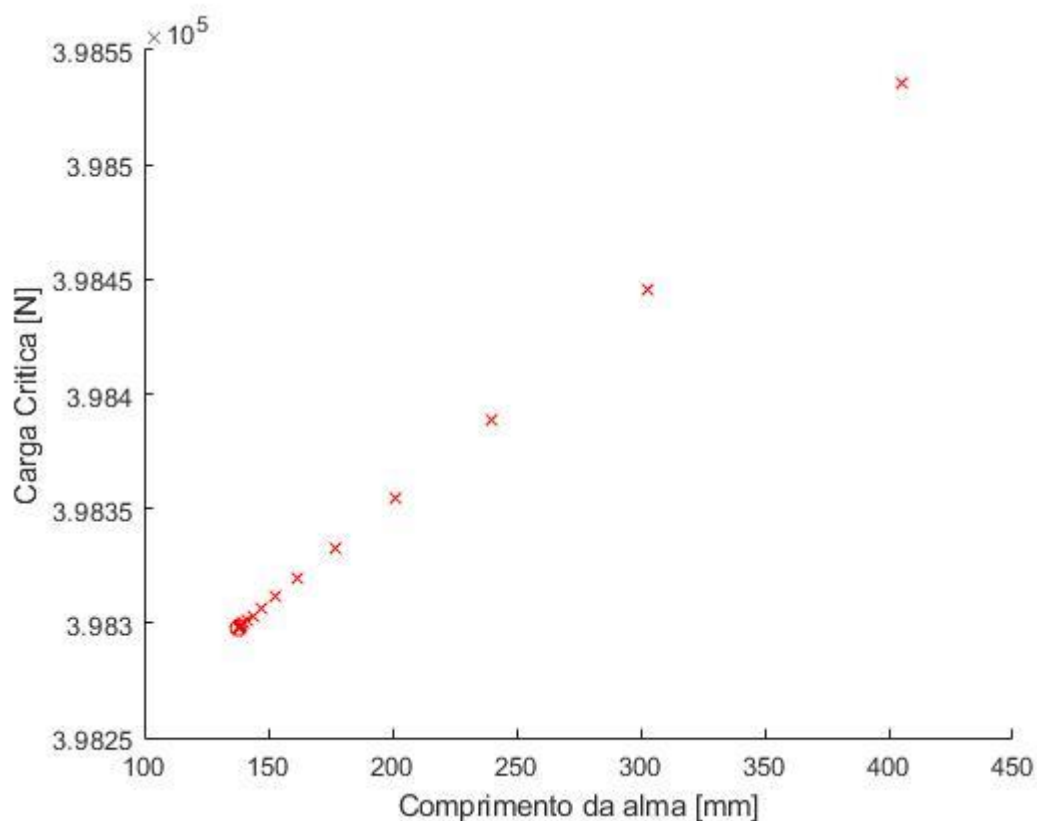


Figura 22: Influência do comprimento da alma sobre a carga crítica em viga W.

(Fonte: Elaborado pelo autor utilizando Section Gold em MATLAB)

A Figura 22 demonstra que, ao aumentar o comprimento da alma (h), mantendo a espessura da alma (t_w), o comprimento da mesa (b_f) e a espessura da mesa (t_f) constantes, a carga crítica resistente aumenta linearmente, mas, novamente, os valores encontrados apresentam pequena diferença.

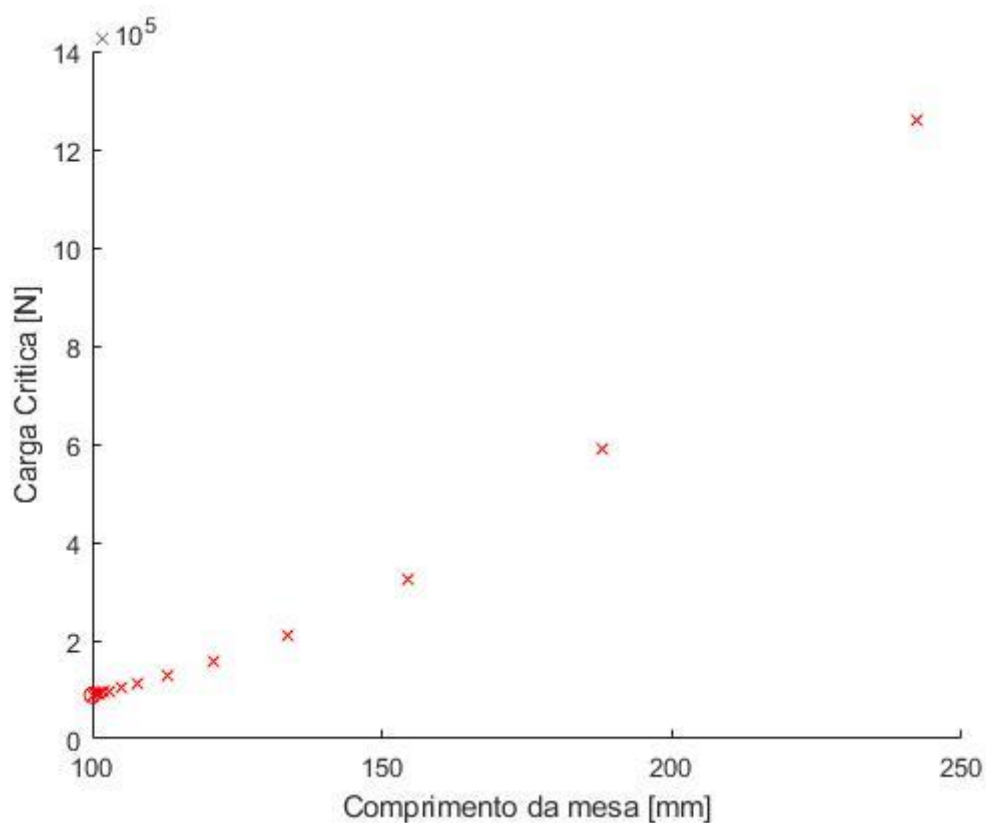


Figura 23: Influência do comprimento da mesa sobre a carga crítica em viga W.

(Fonte: Elaborado pelo autor utilizando Section Gold em MATLAB)

A Figura 23 demonstra que, ao aumentar o comprimento da mesa (b_f), mantendo a espessura da alma (t_w), o comprimento da alma (h) e a espessura da mesa (t_f) constantes, a carga crítica resistente aumenta exponencialmente, além de apresentar diferença significativa de valores.

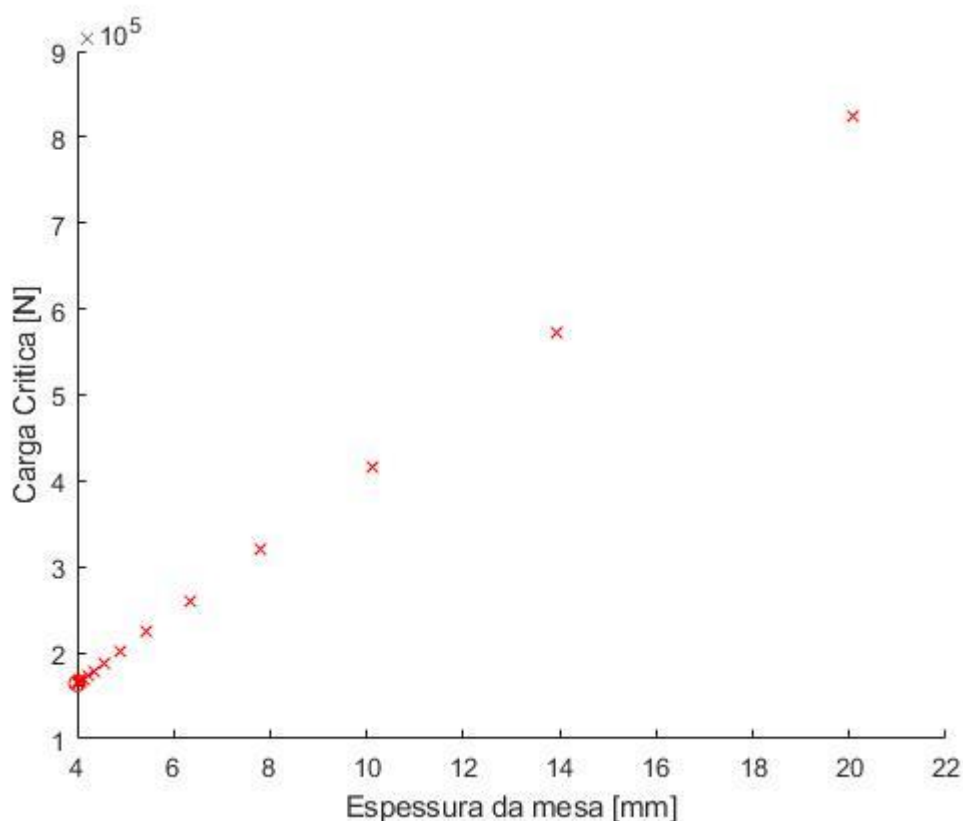


Figura 24: Influência da espessura da mesa sobre a carga crítica em viga W.

(Fonte: Elaborado pelo autor utilizando Section Gold em MATLAB)

A Figura 24 demonstra que, ao aumentar a espessura da mesa (t_f), mantendo a espessura da alma (t_w), o comprimento da alma (h) e o comprimento da mesa (b_f) constantes, a carga crítica resistente aumenta linearmente, apresentando diferença significativa nos valores.

Considerando os dados obtidos, percebe-se que as dimensões que mais influenciam na resistência à carga crítica do eixo y dentro dos parâmetros avaliados são o comprimento da mesa (b_f) e a espessura da alma (t_w). Com isso, cada processo de otimização via Fmicon utilizará uma dessas variáveis. As variáveis que serão alteradas inicialmente para minimizar a área via Fmicon são a espessura da alma (t_w) e o comprimento da mesa (b_f), mantendo a espessura da mesa (t_f) e o comprimento da alma (h) constantes.

O comprimento de mesa (b_f) para a viga com a menor massa que suporta a carga crítica de 63800kN foi:

$$b_{f_{min}} = 112,8mm \quad (4.1)$$

O bf original era de 165mm, assim:

$$\frac{165 - 112,8}{165}(100) = 31,37\% \text{ de redução} \quad (4.2)$$

A espessura de alma (tw) para a viga com a menor massa que suporta a carga crítica de 63800kN foi:

$$tw_{min} = 4,3mm \quad (4.3)$$

O tw original era de 5,8mm, assim:

$$\frac{5,8 - 4,3}{5,8}(100) = 25,86\% \text{ de redução} \quad (4.4)$$

Após determinado o novo comprimento de mesa (bf) e a nova espessura da alma (tw), a função massa foi novamente minimizada, dessa vez considerando a espessura da mesa (bf) e o comprimento da alma (h) como variáveis.

O comprimento da alma (h) para a viga com a menor massa que suporta a carga crítica de 63800kN foi:

$$h_{min} = 138mm \quad (4.5)$$

O h original era de 291mm, assim:

$$\frac{291 - 138}{291}(100) = 52,58\% \text{ de redução} \quad (4.6)$$

A espessura de mesa (tf) para a viga com a menor massa que suporta a carga crítica de 63800kN foi:

$$tf_{min} = 9,7mm \quad (4.7)$$

O t_f original era de 9,7mm. Esse valor não teve redução.

Verifica-se que os valores encontrados são todos inferiores aos da viga W dimensionada no item 3.16 deste trabalho.

Aplicando a equação 2.5 para encontrar a carga crítica de flambagem no eixo y:

$$\begin{aligned}
 N_{ey} &= \frac{\pi^2 * 200 * 10^9 * \left\{ 0,0097 * \frac{0,138^3}{12} + \frac{0,1128}{12} [(0,138 + 0,0097)^3 - 0,138^3] \right\}}{(1 * 6)^2} \quad (4.8) \\
 &= 63,59kN
 \end{aligned}$$

Verifica-se que o valor encontrado em 4.8 representa 99,7% da carga solicitada verificada no item 3.1.5, demonstrando a viabilidade do método para reduzir as dimensões de um elemento metálico viga W, conhecendo-se a carga para a qual se deseja otimizar.

5 CONCLUSÃO

Este documento consiste em um trabalho de conclusão de curso para o programa de bacharelado em Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, com o tema de pesquisa “Estruturas Metálicas: Dimensionamento de Colunas via Técnica Section Gold”, sob a orientação do Prof. Me. Eng. Bruno dos Santos.

O trabalho teve como objetivo realizar um comparativo das dimensões de projeto via NBR 8800 de uma coluna metálica com as dimensões encontradas minimizando a função massa da coluna via método Section Gold. A modelagem do perfil se fez através de várias iterações, alterando as dimensões até encontrar o perfil com a menor massa que atendesse à solicitação de carga.

Com o estudo, pôde-se validar a eficiência do método Section Gold para a análise das variáveis de seção de vigas W. Em razão de a metodologia apresentar dimensionamento considerando as equações clássicas da resistência dos materiais que atendeu à carga de projeto, é demonstrada a aplicabilidade da metodologia Section Gold.

Os exemplos apresentados neste trabalho nos aproximam da conclusão de que, apesar de a NBR 8800 fornecer método de cálculo viáveis para as estruturas metálicas, não determina método para minimizar o custo de material, solução que é possível a partir dos métodos numéricos, a exemplo deste trabalho, havendo 57% de redução de material nas colunas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os conhecimentos obtidos através do desenvolvimento deste projeto de dissertação podem ser consideravelmente ampliados através das seguintes recomendações de trabalhos futuros:

- (i) O trabalho considerou apenas a geometria do perfil W para o dimensionamento. Pode-se realizar as mesmas verificações considerando diferentes geometrias de perfil.
- (ii) Neste trabalho foi realizado o dimensionamento do elemento de coluna em estruturas metálicas. É possível verificar a aplicabilidade da metodologia em outros elementos de estruturas metálicas, bem como em diferentes materiais de construção.

- (iii) Os métodos utilizados neste trabalho permitiram reduzir duas dimensões por vez. Pode-se seguir o mesmo procedimento utilizando ferramenta matemática que permita minimizar todas as variáveis simultaneamente.
- (iv) Sugere-se realizar ensaio prático de resistência aos perfis aqui apresentados, visto que o trabalho foi realizado apenas em âmbito teórico.
- (v) Por fim, é possível e indicado aplicar diferentes métodos de otimização para a redução de material e estabelecer comparativos.

REFERÊNCIAS

ABBET, R. W. **American civil engineering practice**. John Wiley & sons. 1957.

AÇO BRASIL. **Uma viagem pela indústria do aço**. Disponível em <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/10/LIVRO_ACO_BX.pdf> Acesso em: 20 maio 2021.

AÇOS NOBRE. **Aços ferramenta**. Disponível em <<https://acosnobre.com.br/blog/acos-ferramenta-matrizes-corte-trabalho-a-frio-tipos/>> Acesso em: 12 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6123: Força do vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ARORA, J. S. **Introduction to Optimum Design**. Elsevier Academic Press. 2004.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço – projeto e cálculo**. Pini. 2003.

BNDES. **O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: um panorama do período 2001-2010**. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1517/1/A%20set.35_O%20crescimento%20da%20ind%C3%BAstria%20brasileira%20de%20estruturas_P.pdf> Acesso em: 12 out. 2021.

GAN COBERTURA INDUSTRIAL. Disponível em <<http://gancoberturaindustrial.com.br/fechamento-lateral-telha-trapezoidal.html>> Acesso em: 14 out. 2021.

FULL ESTRUTURAS. Disponível em <<http://fullestruturas.com.br/estrutura-metalica-para-galpao/>> Acesso em: 13 out.

FRANCISCO, S. V. L. **Entre o fascínio e a realidade da razão áurea**. São José do Rio Preto, 2017.

GERDAU. **Catálogo Gerdau perfis estruturais**. Disponível em <<https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/28792/22314/catalogo-gerdau-perfis-estruturais.pdf>> Acesso em: 12 out. 2021.

GALVAMINAS. **Tipos de estruturas metálicas**. Disponível em <<https://www.galvaminas.com.br/blog/tipos-de-estruturas-metalicas/>> Acesso em: 13 out. 2021.

GRUPO MB. Disponível em <<https://grupomb.ind.br/mbobras/economia-de-energia/galpao-industrial/>> Acesso em: 13 out. 2021.

HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. Pearson. 2008

LAMARCK. Disponível em <<https://www.lamarck.com.br/valvula-aco-liga.php>> Acesso em: 13 out. 2021.

MAXTON LOGÍSTICA. **Tipos de galpão de armazenamento**. Disponível em <<https://maxtonlogistica.com.br/conheca-os-tipos-de-galpao-de-armazenamento/>> Acesso em: 13 out. 2021.

MATHWORKS. Disponível em <https://www.mathworks.com/help/optim/solver-based-nonlinear-optimization.html?s_tid=CRUX_topnav> Acesso em: 13 out. 2021.

MDL. Disponível em <<http://www.madeiradelei.com/site/index.php/aco>> Acesso em: 14 out. 2021.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**. 8 ed. LTC, 2009.

PINHEIRO, A. C. F. B. **Estruturas metálicas**. Blucher. 2005

ROQUIM, F. **Modelos lineares generalizados: Estudo do método de Newton-Raphson para estimação de parâmetros através de um modelo logístico**. Disponível em <https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Demonstracao-visual-do-metodo-de-Newton-Raphson-2-iteracoes_fig1_332069106> Acesso em: 19 out. 2021.

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO. **VisualVentos**. Disponível em <http://www.ertools.upf.br/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=15> Acesso em: 19 out. 2021.

WOLFRAM ALPHA. **Computational inteligente**. Disponível em <<https://www.wolframalpha.com/>> Acesso em: 19 out. 2021.

APÊNDICE A

Algoritmo para otimização de uma coluna via Fmincon

```
% --OTIMIZAÇÃO FMINCON ---%
% Trabalho de Conclusão de Curso%
```

```
function [g, h] = column_conf (x)
x1 = x(1); x2 = x(2);

% Definir os parâmetros de entrada
P = 63800; % Carregamento (N)
E = 200e9; % Modulo de Elasticidade
conforme NBR 8800 (Pa)
L = 6.0; % Comprimento do pilar (m)
Sy = 345e6; % Tensão de escoamento (Pa)
bf = 0.1128; % Largura da mesa (m)
tw = 0.0043; % Espessura da alma (m)
```

```
% Restrições de desigualdade "g>=0"
```

```
g(1) = P/((2*(bf*x1)+(x2*tw))/Sy - 1;
g(2) = 1 -
pi^2*E*(((tw*x2^3/12)+(bf/12)*((x2+x1)^3-
x2^3)))/L^2/P;
g(3) = 1 -
pi^2*E*(((tw^3*x2/12)+(bf^3/12)*((x2+x1)-
x2)))/L^2/P;
```

```
%Restrições de igualdade "h=0"
h = [];
```

```
function f = column_objf (x)
% Renomear variáveis de otimização
x1 = x(1); x2 = x(2);
% Definir os parâmetros de entrada
L = 6.0; % Comprimento da coluna (m)
rho = 7786.72; % Densidade (kg/m^3)
bf = 0.1128; % Largura da mesa (m)
tw = 0.0043; % Espessura da alma (m)
f = rho*L*((2*bf*x1)+(x2*tw)); % Massa da
coluna

% Definir opções
options = optimset ('LargeScale', 'off', 'TolCon',
1e-8, 'TolX', 1e-8);
% Definir máximos e mínimos para a
otimização, baseado no catálogo
Lb = [0.0049 0.138]; Ub = [0.0277 0.573];
% Definir valor inicial, baseado em viga do
catálogo
x0 = [0.0097 0.291];
% chamar o processo de otimização para
encontrar o mínimo da função, fmincon
[x, FunVal, ExitFlag, Output] =
fmincon('column_objf', x0, [], [], [], [], Lb, Ub,
'column_conf', options)
```

APÊNDICE B

Algoritmo para otimização de uma coluna via método Section Gold

```
% --GOLDEN SECTION METHOD ---%
% Trabalho de Conclusão de Curso%
```

```
figure; hold on; % Criando o gráfico
xlabel('Espessura da alma [mm]'); % Definindo legenda do eixo x
ylabel('Carga Critica [N]'); % Definindo legenda do eixo y

% Início do intervalo
a=5;

% Fim do intervalo
b=10;
epsilon=0.001000; % accuracy valor
iter= 50; % máximo número de iterações
tau=double((sqrt(5)-1)/2); % coeficiente da seção aurea, em torno de 0.618
k=0; % Número de iterações
```

```
x1=a+(1-tau)*(b-a); % computando os valores
x2=a+tau*(b-a);
```

```
f_x1=f(x1); % computando os valores em pontos
f_x2=f(x2);
```

```
plot(x1,f_x1,'rx') % plotando x
plot(x2,f_x2,'rx')
```

```
while ((abs(b-a)>epsilon) && (k<iter))
```

```
    k=k+1;
    if(f_x1<f_x2)
        b=x2;
        x2=x1;
        x1=a+(1-tau)*(b-a);
```

```
        f_x1=f(x1);
        f_x2=f(x2);
```

```
    else
        a=x1;
        x1=x2;
        x2=a+tau*(b-a);
```

```
        f_x1=f(x1);
        f_x2=f(x2);
```

```
        plot(x2,f_x2,'rx')
    end
```

```
    k=k+1;
end
```

```
% Escolha do ponto minimo
if(f_x1<f_x2)
    sprintf('x_min=%f', x1)
    sprintf('f(x_min)=%f ', f_x1)
    plot(x1,f_x1,'ro')
else
    sprintf('x_min=%f', x2)
    sprintf('f(x_min)=%f ', f_x2)
    plot(x2,f_x2,'ro')
end
```

```
function y=f(x)
```

```
E=200*10^9; %Modulo de Elasticidade [Pa]
k=1; %Coeficiente de flambagem
l=6; %Comprimento da coluna [metros]
tf=9.7; %espessura da mesa [mm]
bf=165; %comprimento da mesa [mm]
%tw=5.8; %espessura da alma [mm]
h=291; %comprimento da alma [mm]
```

```
%%% Pcritico em função da espessura da alma x = tw
p=((3.1415^2*E*(((x/1000)^3*(h/1000))/12))+((bf/1000)^3/12)*(((h+2*tf)/1000)-(h/1000))))/l^2
```

ANEXO A

Catálogo Gerdau de Bitolas para perfil W

TABELA DE BITOLAS

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _i mm	ESPESSURA			h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X			EIXO Y - Y			r _i cm	I _i cm ⁴	ESBELTEZ		C _e cm ²	u m ² /m	BITOLA in x lb/ft	
				t _c mm	t _f mm	t _w mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm			Z _x cm ³	Z _y cm ³				MESA-λ _{ALMA} b _i /2t _w
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49	4,161	0,67	W 6 x 8,5
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48	6,683	0,69	W 6 x 12
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	102	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48	10,417	0,88	W 6 x 15
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48	30,277	0,69	W 6 x 16
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	103	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	566	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94	30,277	0,90	W 6 x 20
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	104	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	87	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67	39,930	0,91	W 6 x 25
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,56	2,05	9,62	39,44	8,222	0,77	W 8 x 10
W 200 x 22,5	22,5	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31	11,098	0,79	W 8 x 13
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,0	190	170	34,2	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,9	2,63	6,18	6,38	27,42	13,868	0,79	W 8 x 15
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,0	3,60	12,59	6,57	26,50	40,822	0,93	W 8 x 21
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,0	4,50	14,51	8,09	25,90	69,502	1,03	W 8 x 24
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,7	4,53	23,19	7,03	21,86	83,948	1,04	W 8 x 28
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4548	447,6	8,81	495,3	1535	151,2	5,12	229,5	5,58	22,01	9,23	22,36	141,342	1,19	W 8 x 31
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5298	514,4	8,90	572,5	1784	174,9	5,16	265,8	5,61	33,34	8,10	19,85	166,710	1,19	W 8 x 35
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4977	488,0	8,55	551,3	1673	161,7	4,96	248,6	5,57	31,93	9,16	14,28	155,075	1,20	HP 8 x 36
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6140	584,8	8,99	655,9	2041	199,1	5,18	303,0	5,64	47,69	7,22	17,32	195,418	1,20	W 8 x 40
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7660	709,2	9,17	803,2	2537	246,3	5,28	374,5	5,70	81,66	5,92	15,80	249,976	1,22	W 8 x 48
W 200 x 86,0 (H)	86,0	229	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9498	855,7	9,26	984,2	3139	300,4	5,32	458,7	5,77	142,19	5,07	12,06	317,844	1,23	W 8 x 58
W 200 x 100,0 (H)*	100,0	229	210	14,5	23,7	182	158	127,1	11355	991,7	9,45	1152,2	3664	349,0	5,37	533,4	5,80	212,61	4,43	10,87	385,454	1,25	W 8 x 67
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2991	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,8	2,48	2,54	9,53	45,92	13,735	0,88	W 10 x 12
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,4	2,54	4,77	7,39	37,97	18,629	0,89	W 10 x 15
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,4	2,58	7,06	6,07	36,10	22,955	0,89	W 10 x 17
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,9	2,62	10,34	5,10	34,38	27,636	0,90	W 10 x 19
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,7	3,86	10,44	8,02	36,03	73,104	1,07	W 10 x 22
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,1	3,93	17,63	6,56	33,27	93,242	1,08	W 10 x 26
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220	57,6	7158	538,2	11,15	606,3	704	95,1	3,50	146,4	3,96	27,14	5,69	28,95	112,398	1,09	W 10 x 30
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	8728	709,6	10,67	790,5	2995	234,0	6,13	357,8	6,89	33,46	11,96	19,10	414,130	1,47	HP 10 x 42
W 250 x 73,0 (H)	73,0	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	11257	889,9	11,02	983,3	3880	305,5	6,47	463,1	7,01	56,94	8,94	23,33	552,900	1,48	W 10 x 49
W 250 x 80,0 (H)	80,0	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	12550	980,5	11,10	1088,7	4313	338,3	6,51	513,1	7,04	75,02	8,17	21,36	622,878	1,49	W 10 x 54
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254	280	14,4	14,4	225	201	108,5	12280	966,9	10,64	1093,2	4225	325,0	6,24	499,6	7,00	92,07	9,03	13,97	605,403	1,50	HP 10 x 57
W 250 x 89,0 (H)	89,0	260	256	10,7	17,3	225	201	113,9	14237	1095,1	11,18	1224,4	4841	378,2	6,52	574,3	7,06	102,81	7,40	18,82	712,351	1,50	W 10 x 60
W 250 x 101,0 (H)	101,0	264	257	11,9	19,6	225	201	128,7	16352	1238,8	11,27	1395,0	5549	431,5	6,57	656,3	7,10	147,70	6,56	16,87	828,031	1,51	W 10 x 68
W 250 x 115,0 (H)	115,0	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	18920	1406,7	11,38	1597,4	6405	494,6	6,62	752,7	7,16	212,00	5,86	14,87	975,265	1,53	W 10 x 77
W 250 x 131,0 (H)*	131,0	275	281	15,4	25,1	225	193	167,8	22243	1617,7	11,51	1855,6	7448	570,7	6,66	870,7	7,21	321,06	5,20	12,52	1,161,225	1,54	W 10 x 88
W 250 x 149,0 (H)*	149,0	282	283	17,3	28,4	225	193	190,5	26027	1845,9	11,69	2137,5	8624	655,8	6,73	1001,7	7,27	462,06	4,63	11,17	1,384,436	1,55	W 10 x 100
W 250 x 167,0 (H)*	167,0	289	265	19,2	31,8	225	193	214,0	30110	2093,7	11,86	2435,3	9880	745,7	6,79	1140,2	7,33	644,95	4,17	10,07	1,631,156	1,57	W 10 x 112
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3776	249,2	11,77	291,9	98	19,5	1,90	31,4	2,42	3,27	8,86	53,25	21,628	0,98	W 12 x 14
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4346	285,0	11,89	333,2	116	22,9	1,94	36,9	2,45	4,65	7,54	48,50	25,594	0,99	W 12 x 16
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	291	271	36,5	5000	356,0	12,28	412,0	158	31,0	2,08	49,4	2,55	8,14	5,73	45,20	35,441	1,00	W 12 x 19
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	291	271	42,1	6570	419,8	12,49	485,3	192	37,6	2,13	59,8	2,58	12,91	4,72	41,12	43,612	1,00	W 12 x 22
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	291	271	49,7	8581	553,6	13,14	544,4	727	88,1	3,82	134,9	4,38	13,20	8,51	46,66	163,728	1,25	W 12 x 26
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271	57,2	9997	638,8	13,22	712,8	855	103,0	3,87	158,0	4,41	19,90	7,41	41,00	194,433	1,26	W 12 x 30
W 310 x 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	291	271	67,0	11909	751,4	13,33	842,5	1026	122,9	3,91	188,8	4,45	31,81	6,33	35,61	236,422	1,27	W 12 x 35
W 310 x 60,0*	60,0	303	203	7,5	13,1	277	245	76,1	12908	852,0	13,02	944,3	1829	228,7	4,90	275,4	5,48	40,46	6,99	26,11	383,747	1,38	W 12 x 40
W 310 x 67,0*	67,0	306	204	8,5	14,6	277	245	85,3	14559	951,5	13,06	1060,4	2069	202,8	4,92								

HP 310x125.0 (H)	125.0	312	312	17.4	17.4	277	245	159.0	27076	1735.6	13.05	1983.3	882.3	585.6	7.45	870.6	8.38	177.98	8.97	14.09	1.911.029	1.81	HP 12 x 84
W 310 x 129.0 (H)*	129.0	318	308	13.1	20.6	277	245	165.4	30819	1938.3	13.65	2167.6	1003.9	651.9	7.79	991.2	8.48	214.66	8.55	18.69	2.218.146	1.82	W 12 x 87
HP 310 x 132.0 (H)	132.0	314	313	18.3	18.3	277	245	167.5	28731	1938.3	13.10	2075.5	937.1	598.8	7.48	922.4	8.41	206.79	8.55	13.41	2.044.445	1.81	HP 12 x 89
W 310 x 143.0 (H)*	143.0	323	309	14.0	22.9	277	245	182.5	34812	2155.6	13.81	2422.2	1127.0	729.4	7.86	1109.2	8.52	288.76	6.75	17.51	2.535.314	1.83	W 12 x 96
W 310 x 150.0 (H)*	150.0	327	310	15.5	25.1	277	245	200.7	36681	2365.8	13.88	2675.7	1247.4	804.8	7.88	1225.2	8.55	379.96	6.18	15.69	2.839.709	1.84	W 12 x 106
W 310 x 179.0 (H)*	179.0	333	313	18.0	28.1	277	245	227.9	44580	2877.5	13.99	3066.2	1437.8	918.7	7.94	1401.7	8.62	541.03	5.57	13.60	3.337.666	1.85	W 12 x 120
HP 310x202.0 (H)*	202.0	341	315	20.1	31.8	277	245	258.3	52030	3057.6	14.19	3513.7	1658.9	1053.2	8.01	1608.7	8.69	777.99	4.95	12.21	3.959.374	1.87	W 12 x 136
W 360 x 32.9	32.9	349	127	5.8	33.2	308	42.1	8358	479.0	14.09	547.6	291	45.9	2.63	72.0	3.20	9.15	7.47	53.10	84.111	1.17	W 14 x 22	
W 360 x 39.0	39.0	353	128	6.5	10.7	332	308	50.2	10331	585.3	14.35	667.7	375	58.6	2.73	91.9	3.27	15.83	5.98	47.32	109.551	1.18	W 14 x 26
W 360 x 44.6	44.6	352	171	6.9	9.8	332	308	57.7	12258	686.5	14.58	784.3	818	95.7	3.77	148.0	4.49	16.70	8.72	44.70	239.091	1.35	W 14 x 30
W 360 x 51.0	51.0	355	171	7.2	11.6	332	308	64.8	14222	801.2	14.81	899.5	968	113.3	3.87	174.7	4.43	24.65	7.37	42.75	284.994	1.36	W 14 x 34
W 360 x 58	58.0	358	172	7.9	13.1	332	308	72.5	16743	901.8	14.92	1014.8	1113	129.4	3.92	199.8	4.53	34.45	6.56	38.96	330.394	1.37	W 14 x 38
W 360 x 64.0	64.0	347	203	7.7	13.5	320	288	81.7	17890	1031.1	14.80	1145.5	1885	185.7	4.80	284.5	5.44	44.57	7.52	37.40	523.362	1.46	W 14 x 43
W 360 x 72.0	72.0	350	204	8.6	15.1	320	288	91.3	20169	1152.5	14.86	1285.9	2140	209.8	4.84	321.8	5.47	61.18	6.75	33.47	599.082	1.47	W 14 x 48
W 360 x 79.0	79.0	354	205	9.4	16.8	320	288	101.2	22713	1283.2	14.98	1437.0	2416	235.7	4.89	361.9	5.51	82.41	6.10	30.68	685.701	1.48	W 14 x 53
W 360 x 91.0 (H)	91.0	353	254	9.5	16.4	320	288	115.9	26755	1518.4	15.19	1680.1	4483	353.0	6.22	538.1	6.90	92.61	7.74	30.34	1.268.709	1.68	W 14 x 61
W 360 x 101.0 (H)	101.0	357	255	10.5	18.3	320	288	129.5	30279	1696.3	15.29	1888.9	5063	397.1	6.25	606.1	6.93	128.47	6.97	27.28	1.450.410	1.68	W 14 x 68
W 360 x 110.0 (H)	110.0	360	256	11.4	19.9	320	288	140.6	33155	1841.9	15.36	2059.3	5570	435.2	6.29	664.5	6.96	161.93	6.43	25.28	1.609.070	1.69	W 14 x 74
W 360 x 122.0 (H)	122.0	363	257	13.0	21.7	320	288	155.3	36599	2016.5	15.35	2269.8	6147	478.4	6.29	732.4	6.98	212.70	5.92	22.12	1.787.806	1.70	W 14 x 82
W 410 x 38.8	38.8	399	140	6.4	8.8	381	357	50.3	12777	640.5	15.94	736.8	404	57.7	2.83	90.9	3.49	11.69	7.95	55.84	153.190	1.32	W 16 x 26
W 410 x 46.1	46.1	403	140	7.0	11.2	381	357	59.2	15690	778.7	16.27	891.1	514	73.4	2.95	115.2	3.55	20.06	6.25	50.94	198.571	1.33	W 16 x 31
W 410 x 53.0	53.0	403	177	7.5	10.9	381	357	68.4	18734	929.7	16.55	1052.2	1009	114.0	3.84	176.9	4.56	23.38	8.12	47.63	387.194	1.48	W 16 x 36
W 410 x 60.0	60.0	407	178	7.7	12.8	381	357	76.2	21707	1066.7	16.88	1201.5	1205	135.4	3.98	209.2	4.65	33.78	6.95	46.42	467.404	1.49	W 16 x 40
W 410 x 67.0	67.0	410	179	8.8	14.4	381	357	86.3	24678	1203.8	16.91	1362.7	1379	154.1	4.00	239.0	4.67	48.11	6.22	40.59	538.546	1.50	W 16 x 45
W 410 x 75.0	75.0	413	180	9.7	16.0	381	357	95.8	27616	1337.3	16.98	1518.6	1559	173.2	4.03	269.1	4.70	65.21	5.63	36.80	612.784	1.51	W 16 x 50
W 410 x 85.0	85.0	417	181	10.9	18.2	381	357	108.6	31578	1518.4	17.07	1731.7	1804	199.3	4.08	310.4	4.74	94.48	4.97	32.72	715.165	1.52	W 16 x 57
W 460 x 52.0	52.0	450	152	7.6	10.8	428	404	66.6	21360	942.8	17.91	1095.9	634	83.5	3.09	131.7	3.79	21.79	7.04	53.21	304.837	1.47	W 18 x 35
W 460 x 60.0	60.0	455	153	8.0	13.3	428	404	76.2	22562	1127.1	18.35	1292.1	796	104.1	3.23	163.4	3.89	34.60	5.75	50.55	387.230	1.49	W 18 x 40
W 460 x 68.0	68.0	459	154	9.1	15.4	428	404	87.6	23851	1300.7	18.46	1405.4	941	122.2	3.28	192.4	3.93	52.29	5.00	44.42	461.163	1.50	W 18 x 46
W 460 x 74.0	74.0	457	190	9.0	14.5	428	404	94.9	33415	1462.4	18.77	1657.4	1661	174.8	4.18	271.3	4.93	52.97	6.55	44.89	811.417	1.64	W 18 x 50
W 460 x 82.0	82.0	460	191	9.9	16.0	428	404	104.7	37157	1615.8	18.84	1836.4	1862	195.0	4.22	303.3	4.96	70.62	5.97	40.81	915.745	1.64	W 18 x 55
W 460 x 89.0	89.0	463	192	10.5	17.7	428	404	114.1	41105	1775.6	18.98	2019.4	2093	218.0	4.28	339.0	5.01	92.49	5.42	38.44	1.035.073	1.65	W 18 x 60
W 460 x 97.0	97.0	466	193	11.4	19.0	428	404	123.4	44658	1916.7	19.03	2187.4	2283	236.6	4.30	368.8	5.03	115.05	5.08	35.44	1.137.180	1.66	W 18 x 65
W 460 x 106.0	106.0	469	194	12.6	20.6	428	404	135.1	48978	2088.6	19.04	2394.6	2515	259.3	4.32	405.7	5.05	148.19	4.71	32.05	1.260.063	1.67	W 18 x 71
W 530 x 85.0	85.0	525	165	8.9	11.4	502	478	83.6	34971	1332.2	20.46	1558.0	857	103.9	3.20	166.0	4.02	31.52	7.24	53.73	562.854	1.67	W 21 x 44
W 530 x 72.0	72.0	524	207	9.0	10.9	502	478	91.6	39969	1525.5	20.89	1755.9	1615	156.0	4.20	244.6	5.16	33.41	9.50	53.13	1.060.548	1.84	W 21 x 48
W 530 x 74.0	74.0	529	166	9.7	13.6	502	478	95.1	40969	1549.9	20.76	1804.9	1041	125.5	3.31	200.1	4.10	47.39	6.10	49.26	688.558	1.68	W 21 x 50
W 530 x 82.0	82.0	528	209	9.5	13.3	501	477	104.5	47569	1801.8	21.34	2058.5	2028	194.1	4.41	302.7	5.31	51.23	7.86	50.25	1.340.255	1.85	W 21 x 55
W 530 x 85.0	85.0	535	166	10.3	16.5	502	478	107.7	48453	1811.3	21.21	2099.8	1263	152.2	3.42	241.6	4.17	72.93	5.03	46.41	845.463	1.69	W 21 x 57
W 530 x 92.0	92.0	533	209	10.2	15.6	502	478	117.6	55157	2069.7	21.65	2359.8	2379	227.6	4.50	354.7	5.38	75.90	6.70	46.84	1.588.565	1.86	W 21 x 62
W 530 x 101.0	101.0	537	210	10.9	17.4	502	478	130.0	62198	2316.5	21.87	2640.4	2693	256.5	4.55	400.6	5.40	106.04	6.03	43.14	1.812.734	1.86	W 21 x 68
W 530 x 109.0	109.0	539	211	11.6	18.8	501	469	139.7	67226	2494.5	21.94	2847.0	2952	279.8	4.60	437.4	5.44	131.38	5.61	40.47	1.991.291	1.87	W 21 x 73
W 530 x 123.0*	123.0	544	212	13.1	21.2	502	470	157.8	76577	2815.3	22.03	3228.1	3378	318.7	4.63	500.2	5.47	186.69	5.00	35.85	2.300.400	1.88	W 21 x 83
W 530 x 138.0*	138.0	549	214	14.7	23.8	501	469	177.8	87079	3172.3	22.13	3653.3	3904	364.8	4.69	574.5	5.53	262.76	4.50	31.93	2.680.751	1.90	W 21 x 93
W 610 x 82.0	82.0	599	178	10.0	12.8	573	541	105.1	56628	1890.8	23.21	2219.9	1210	135.9	3.39	219.0	4.29	51.82	6.95	54.14	1.033.595	1.86	W 24 x 55
W 610 x 92.0	92.0	603	179	10.9	15.0	573	541	118.4	65277	2165.1	23.48	2535.8	1442	161.1	3.49	259.3	4.37	74.73	5.97	49.63	1.239.349	1.87	W 24 x 62
W 610 x 101.0	101.0	603	228	10.5	14.9	573	541	130.3	77003	2554.0	24.31	2922.7	2951	258.8	4.76	405.0	5.76	81.68	7.65	51.54	2.544.966	2.07	W 24 x 68
W 610 x 113.0	113.0	608	228	11.2	17.3	573	541	145.3	88196	2901.2	24.64	3312.9	3426	300.5	4.86	469.7	5.82	116.50	6.59	48.34	2.981.078	2.08	W 24 x 76
W 610 x 125.0	125.0	612	229	11.9	19.6	573	541	160.1	99184	3241.3	24.89	3697.3	3933	343.5	4.96	536.3	5.89	159.50	5.84	45.45	3.441.766	2.09	W 24 x 84
W 610 x 140.0	140.0	617	230	13.1	22.2	573	541	179.3	112619	3850.5	25.06	4773.1	4515	392.6	5.02	614.0	5.94	225.01	5.18	41.27	3.981.687	2.11	W 24 x 94
W 610 x 153.0*	153.0	623	229	14.0	24.9	573	541	196.5	125783	4038.0	25.30	4622.7	4999	436.6	5.04	683.3	5.94	303.29	4.60	38.66</			

PROPRIEDADES MECÂNICAS

	ASTM A 572 Grau 50	ASTM A 572 Grau 60*	ASTM A 992*	AÇO COR 500*	ASTM A 131 AH32*	ASTM A 131 AH36*
Limite de Escoamento (MPa)	345 mín.	415 mín.	345 a 450	370 mín.	315 mín.	355 mín.
Limite de Resistência (MPa)	450 mín.	520 mín.	450 mín.	500 mín.	440 a 590	490 a 620
Alongamento após ruptura (%)	18 mín.	16 mín.	18 mín.	18 mín.	19 mín.	19 mín.

*Sob encomenda.

As especificações dos aços ASTM A 572 Grau 50 e AÇO COR 500, de acordo com a Norma NBR 7007:2011, são AR 350 e AR 350 COR, respectivamente.

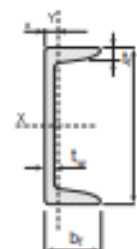
NOTAS

- 1) Variação da massa linear: + 3% ~ - 2,5% para bitolas com massa linear menor que 148 kg/m e +/- 2,5% para as demais bitolas.
- 2) Materiais certificados para uso naval, produzidos sob encomenda.
- 3) Perfis destinados ao mercado europeu com selo CE Marking (S275 e S355, em atendimento à norma EN 10025-2) e ao mercado argentino com selo IRAM INTI (F36 e F26, em atendimento à norma IRAM IAS U500-503). Produzidos sob encomenda.

ANEXO B

Catálogo de bolso barras e perfis Gerdau

PERFIL U GERDAU



Bitola	Peso Nominal	ALMA		ABA		area	EIXO X			EIXO Y			x
pol	kg/m	d	t_w	b_f	t_f	cm ²	I	W	r	I	W	r	cm
		mm	mm	mm	mm		cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	
3"	6,10 7,44	76,20	4,32 6,55	35,81 38,05	6,93 6,93	7,78 9,48	68,90 77,20	18,10 20,30	2,98 2,85	8,20 10,30	3,32 3,82	1,03 1,04	1,11 1,11
4"	8,04 9,30	101,60	4,67 6,27	40,23 41,83	7,52 7,52	10,10 11,90	159,50 174,40	31,40 34,30	3,97 3,84	13,10 15,50	4,61 5,10	1,14 1,14	1,16 1,15
6"	12,20 15,62	152,40	5,08 7,98	48,77 51,66	8,71 8,71	15,50 19,90	546,00 632,00	71,70 82,90	5,94 5,63	28,80 36,00	8,16 9,24	1,36 1,34	1,30 1,27
8"	17,10 20,50	203,20	5,59 7,70	57,40 59,51	9,50 9,50	21,68 25,93	1344,30 1490,00	132,70 147,50	7,87 7,59	54,10 62,40	12,94 14,09	1,42 1,42	1,47 1,42
10"	22,77 29,76	254,00	6,10 9,63	66,04 69,57	11,10 11,10	29,00 37,90	2800,00 3290,00	221,00 259,00	9,84 9,31	95,00 117,00	19,00 21,60	1,81 1,76	1,61 1,54
12"	30,80 37,00	305,00	7,20 9,80	74,00 77,00	12,70 12,70	39,30 47,40	5370,00 6010,00	352,00 394,00	11,70 11,30	161,00 186,00	28,30 30,90	2,03 1,98	1,77 1,71

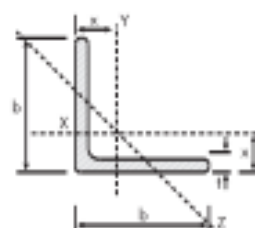
OBS.: As barras são fornecidas com tolerância de comprimento -0+10 cm.

BARRA REDONDA GERDAU



Bitolas		Peso Nominal	Bitolas		Peso Nominal	Bitolas		Peso Nominal
pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m
1/4"	6,35	0,25	1.5/16"	33,34	6,85	2.7/16"	61,91	23,63
5/16"	7,94	0,39	1.3/8"	34,93	7,52	2.1/2"	63,50	24,86
3/8"	9,53	0,56	1.7/16"	36,51	8,22	2.9/16"	65,08	26,11
1/2"	12,70	0,99	1.1/2"	38,10	8,95	2.5/8"	66,68	27,40
9/16"	14,29	1,26	1.9/16"	39,69	9,71	2.3/4"	69,85	30,08
5/8"	15,88	1,56	1.5/8"	41,28	10,50	2.13/16"	71,44	31,45
11/16"	17,46	1,88	1.11/16"	42,86	11,32	2.7/8"	73,03	32,87
3/4"	19,05	2,24	1.3/4"	44,45	12,18	3"	76,20	35,79
13/16"	20,64	2,63	1.13/16"	46,40	13,06	3.1/16"	77,79	37,30
7/8"	22,23	3,05	1.7/8"	47,63	13,98	3.1/8"	79,38	38,84
15/16"	23,81	3,49	2"	50,80	15,91	3.1/4"	82,55	42,01
1"	25,40	3,98	2.1/16"	52,39	16,92	3.7/16"	87,31	46,99
1.1/16"	26,99	4,49	2.1/8"	53,98	17,96	3.1/2"	88,90	48,73
1.1/8"	28,58	5,04	2.1/4"	57,15	20,14	3.3/4"	95,35	55,94
1.3/16"	30,16	5,60	2.5/16"	58,74	21,27	4"	101,60	63,64
1.1/4"	31,75	6,21	2.3/8"	60,33	22,43	4.1/16"	103,19	65,65

CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS GERDAU



Cantoneira em Polegadas										
b		Peso Nominal	t		Área	$I_x=I_y$	$W_x=W_y$	$r_x=r_y$	r_z min.	x
pol	mm	kg/m	pol	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
5/8"	15,880	0,57		2,50						
3/4"	19,050	0,71		2,50						
1/2"	12,700	0,55	1/8"	3,18	0,70	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	15,880	0,71	1/8"	3,18	0,90	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	19,050	0,87	1/8"	3,18	1,11	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	22,200	1,04	1/8"	3,18	1,32	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
1"	25,400	1,19	1/8"	3,18	1,48	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	3/16"	4,76	2,19	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	1/4"	6,35	2,84	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1.1/4"	31,750	1,50	1/8"	3,18	1,93	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	3/16"	4,76	2,77	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	1/4"	6,35	3,62	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1.1/2"	38,100	1,83	1/8"	3,18	2,32	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3/16"	4,76	3,42	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	1/4"	6,35	4,45	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
1.3/4"	44,450	2,14	1/8"	3,18	2,71	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	3/16"	4,76	4,00	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	1/4"	6,35	5,22	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
2"	50,800	2,46	1/8"	3,18	3,10	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	3/16"	4,76	4,58	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	1/4"	6,35	6,06	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	5/16"	7,94	7,42	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
		6,99	3/8"	9,52	8,76	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
2.1/2"	63,500	4,57	3/16"	4,76	5,80	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
		6,10	1/4"	6,35	7,67	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
		7,44	5/16"	7,94	9,48	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
		8,78	3/8"	9,52	11,16	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
3"	76,200	5,52	3/16"	4,76	7,03	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
		7,29	1/4"	6,35	9,29	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
		9,07	5/16"	7,94	11,48	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
		10,71	3/8"	9,52	13,61	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
		14,00	1/2"	12,70	17,74	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36
3.1/2"	88,900	8,56	1/4"	6,35	10,90	83,70	13,00	2,77	1,76	2,46
		10,59	5/16"	7,94	13,50	102,00	16,00	2,75	1,75	2,52
		12,58	3/8"	9,52	16,00	121,00	19,20	2,75	1,75	2,58
4"	101,600	9,81	1/4"	6,35	12,51	125,00	16,40	3,17	2,00	2,77
		12,19	5/16"	7,94	15,48	154,00	21,30	3,15	2,00	2,84
		14,57	3/8"	9,52	18,45	183,00	24,60	3,12	2,00	2,90
		16,80	7/16"	11,11	21,35	208,00	29,50	3,12	1,98	2,95
		19,03	1/2"	12,70	24,19	233,00	32,80	3,10	1,98	3,00
5"	127,000	12,34	1/4"	6,35	15,73	251,63	27,09	4,00	2,53	3,41
		15,31	5/16"	7,94	19,50	308,00	33,40	3,97	2,53	3,47
		18,30	3/8"	9,52	23,29	362,00	39,50	3,94	2,51	3,53
		24,10	1/2"	12,70	30,64	470,00	52,50	3,91	2,49	3,63
		29,80	5/8"	15,88	37,80	566,00	64,00	3,86	2,46	3,76
6"	152,400	23,52	7/16"	11,11	26,96	416,68	45,71	3,93	2,50	3,58
		22,20	3/8"	9,52	28,10	641,00	57,40	4,78	3,02	4,17
		29,20	1/2"	12,70	37,09	828,00	75,40	4,72	3,00	4,27
		36,00	5/8"	15,88	45,86	1007,00	93,50	4,67	2,97	4,39
		42,70	3/4"	19,05	54,44	1173,00	109,90	4,65	2,97	4,52
8"	203,200	48,70	5/8"	15,88	62,90	2472,40	168,90	6,31	4,01	5,66
		57,90	3/4"	19,05	73,81	2901,10	199,90	6,27	3,99	5,79

OBS.: As barras são fornecidas com tolerância de comprimento -0+10 cm.

ANEXO C

Relatório gerado utilizando VisualVentos

Relatório

Observação: Os resultados aqui expostos devem ser avaliados por um profissional com experiência

VisualVentos <http://www.etoools.upf.br>

Este software está registrado no INPI No. 00062090

Dados Geométricos

b = 6,00 m

a = 54,00 m

$b1 = 2 * h$

$b1 = 2 * 6,00$

$b1 = 12,00m$

ou

$b1 = b/2$

$b1 = 6,00/2$

$b1 = 3,00m$

Adota-se o menor valor, portanto

$b1 = 3,00 m$

$a1 = b/3$

$a1 = 6,00/3$

$a1 = 2,00m$

ou

$a1 = a/4$

$a1 = 54,00/4$

$a1 = 13,50m$

Adota-se o maior valor, porém $a1 \leq 2 * h$

$2 * 6,00 = 12,00 m$

Portanto

$a1 = 12,00 m$

$a2 = (a/2) - a1$

$a2 = (54,00/2) - 12,00$

$a2 = 15,00 m$

h = 6,00 m

h1 = 0,53 m

$\beta = 10,00^\circ$

d = 6,00 m

Área das aberturas

Fixas

Face A1 = 0,00 m²

Face A2 = 0,00 m²

Face A3 = 0,00 m²

Face B1 = 0,00 m²

Face B2 = 0,00 m²

Face B3 = 0,00 m²

Face C1 = 0,00 m²

Face C2 = 0,00 m²

Face D1 = 0,00 m²

Face D2 = 0,00 m²

Movéis

Face A1 = 0,00 m²

Face A2 = 0,00 m²

Face A3 = 0,00 m²

Face B1 = 0,00 m²

Face B2 = 0,00 m²

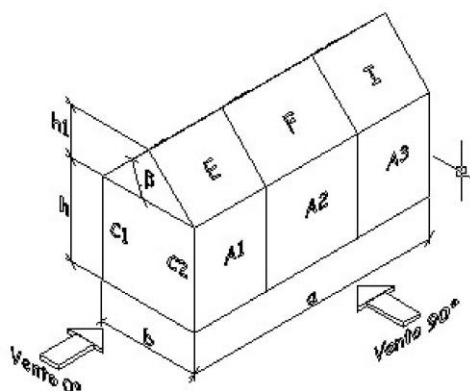
Face B3 = 0,00 m²

Face C1 = 0,00 m²

Face C2 = 0,00 m²

Face D1 = 0,00 m²

Face D2 = 0,00 m²



Velocidade básica do vento

$V_o = 47,00 \text{ m/s}$

Fator Topográfico (S1)

Terreno plano ou fracamente acidentado

$S_1 = 1,00$

Fator de Rugosidade (S2)

Categoria III

Classe C

Parâmetros retirados da Tabela 2 da NBR6123/88 que relaciona Categoria e Classe

$b = 0,93$

$Fr = 0,95$

$p = 0,12$

$S_2 = b * Fr * (z/10)^{exp p}$

$S_2 = 0,93 * 0,95 * (6,53/10)^{exp 0,12}$

$S_2 = 0,84$

Fator Estático (S3)

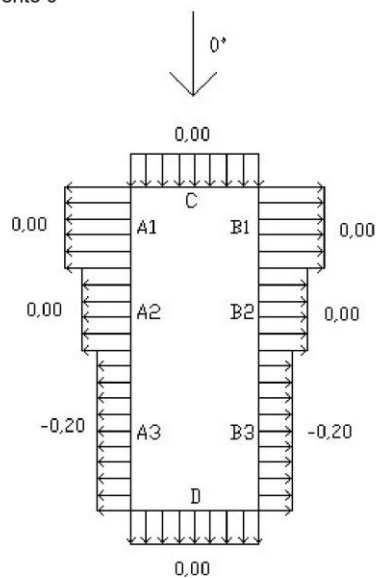
Grupo 3

$S_3 = 0,95$

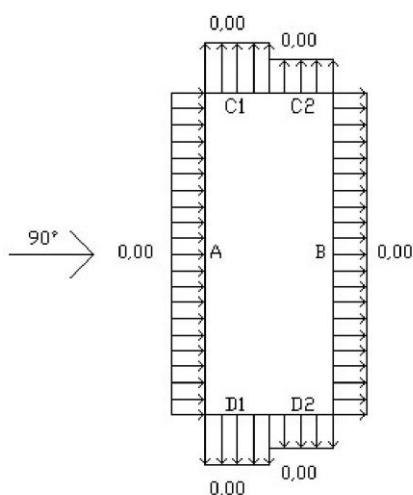
Coefficiente de pressão externa

Paredes

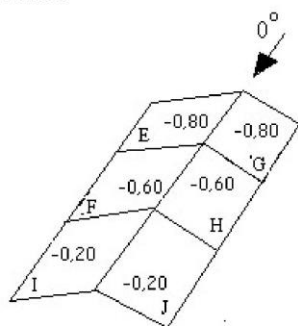
Vento 0°



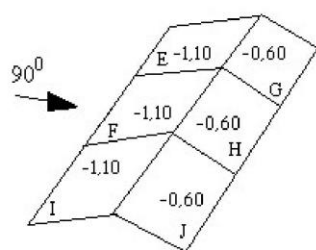
Vento 90°



Telhado
Vento 0°



Vento 90°



Cpe médio = 0,00

Coefficiente de pressão interno

Cpi 1 = 0,20

Cpi 2 = -0,30

Velocidade Característica de Vento

$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$

$V_k = 47,00 \cdot 1,00 \cdot 0,84 \cdot 0,95$

$V_k = 37,56 \text{ m/s}$

Pressão Dinâmica

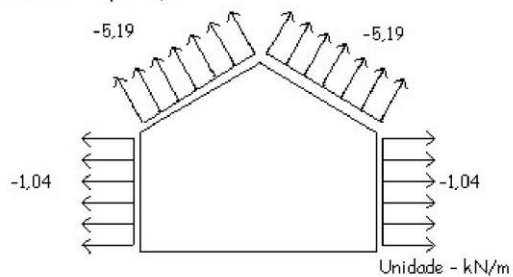
$q = 0,613 \cdot V_k^2$

$$q = 0,613 * 37,56^2$$

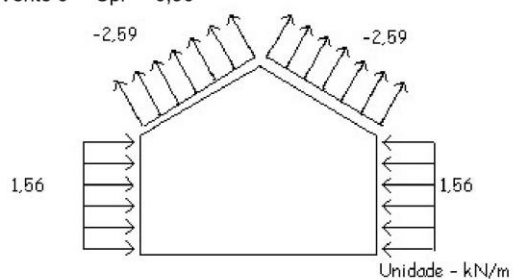
$$q = 0,86 \text{ kN/m}^2$$

Esforços Resultantes

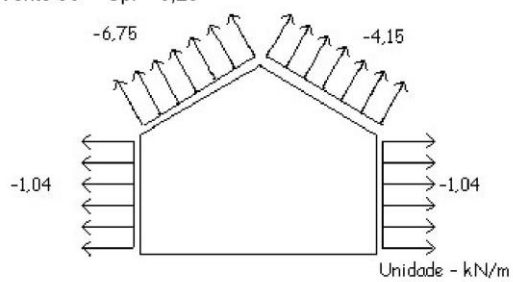
Vento 0° - Cpi = 0,20



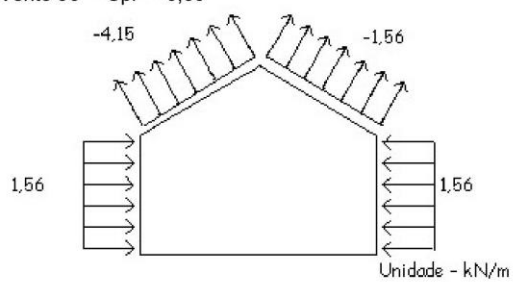
Vento 0° - Cpi = -0,30



Vento 90° - Cpi = 0,20



Vento 90° - Cpi = -0,30



ANEXO D

Anexo F NBR 8800/2008

ABNT NBR 8800:2008

Anexo F (normativo)

Flambagem local de barras axialmente comprimidas

F.1 Generalidades

F.1.1 Os elementos que fazem parte das seções transversais usuais, exceto as seções tubulares circulares, para efeito de flambagem local, são classificados em AA (duas bordas longitudinais vinculadas) e AL (apenas uma borda longitudinal vinculada), conforme 5.1.2.2.1.

F.1.2 As barras submetidas à força axial de compressão, nas quais todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (relações b/t) que não superam os valores de $(b/t)_{lim}$ dados na Tabela F.1, têm o fator de redução total Q igual a 1,00.

F.1.3 As barras submetidas à força axial de compressão, nas quais os elementos componentes da seção transversal possuem relações b/t maiores que os valores de $(b/t)_{lim}$ dados na Tabela F.1 (elementos esbeltos), têm o fator de redução total Q dado por:

$$Q = Q_s Q_a$$

onde Q_s e Q_a são fatores de redução que levam em conta a flambagem local dos elementos AL e AA, cujos valores devem ser determinados como mostrado em F.2 e F.3, respectivamente. Deve-se ainda considerar que:

- a) se a seção possuir apenas elementos AL:

$$Q = Q_s$$

- b) se a seção possuir apenas elementos AA:

$$Q = Q_a$$

F.1.4 As seções tubulares circulares devem ter o coeficiente Q determinado de acordo com F.4.

F.2 Elementos comprimidos AL

Os valores de Q_s a serem usados para os elementos comprimidos AL são os seguintes.

- a) elementos do Grupo 3 da Tabela F.1:

$$Q_s = 1,340 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = \frac{0,53 E}{f_y \left(\frac{b}{t} \right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

ABNT NBR 8800:2008

b) elementos do Grupo 4 da Tabela F.1:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = \frac{0,69 E}{f_y \left(\frac{b}{t} \right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

c) elementos do Grupo 5 da Tabela F.1:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$$

$$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t} \right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$$

com o coeficiente k_c dado por

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76$$

d) elementos do Grupo 6 da Tabela F.1:

$$Q_s = 1,908 - 1,22 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$Q_s = \frac{0,69 E}{f_y \left(\frac{b}{t} \right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

onde:

h é a altura da alma;

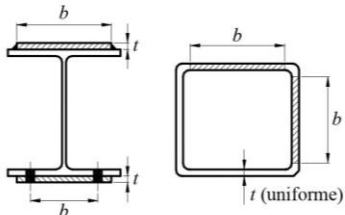
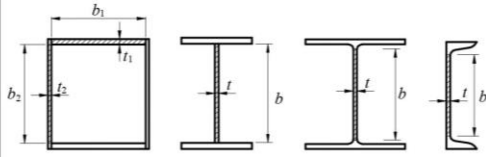
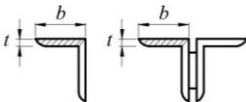
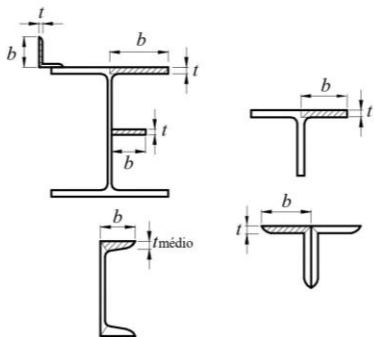
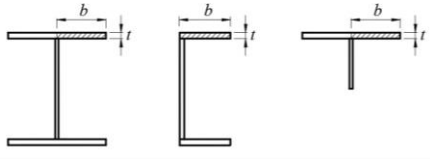
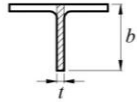
t_w é a espessura da alma;

b e t são a largura e a espessura do elemento, respectivamente (ver Tabela F.1).

Se existirem dois ou mais elementos AL com fatores de redução Q_s diferentes, deve-se adotar o menor destes fatores.

ABNT NBR 8800:2008

Tabela F.1 — Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	- Mesas ou almas de seções tubulares retangulares - Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	- Almas de seções I, H ou U - Mesas ou almas de seção-caixão - Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travejamento		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	- Mesas de seções I, H, T ou U laminadas - Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas - Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	Mesas de seções I, H, T ou U soldadas ^a		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$
	6	Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a O coeficiente k_c é dado em F.2.

F.3 Elementos comprimidos AA

F.3.1 O fator de redução Q_a das seções transversais com elementos comprimidos AA, cuja relação entre largura e espessura ultrapassa os valores indicados na Tabela F.1, é definido como:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

onde A_g é a área bruta e A_{ef} a área efetiva da seção transversal, dada por: $A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) t$ com o somatório estendendo-se a todos os elementos AA. Nessa expressão b e t são, respectivamente, a largura e a espessura de um elemento comprimido AA, conforme Tabela F.1; b_{ef} é a largura efetiva de um elemento comprimido AA, conforme F.3.2.

F.3.2 A largura efetiva dos elementos AA é igual a:

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b$$

onde c_a é um coeficiente, igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para todos os outros elementos e σ é a tensão que pode atuar no elemento analisado, tomada igual a:

$$\sigma = \chi f_y$$

com χ obtido conforme 5.3.3, adotando Q igual a 1,0. Opcionalmente, de forma conservadora, pode-se tomar:

$$\sigma = f_y$$

F.4 Paredes de seções tubulares circulares

Nas seções tubulares circulares, o fator de redução para flambagem local da parede é dado por:

$$\begin{aligned} \text{a) } Q &= 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \\ \text{b) } Q &= \frac{0,038}{D/t} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \quad \text{para} \quad 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \end{aligned}$$

onde:

- D é o diâmetro externo da seção tubular circular;
- t é a espessura da parede.

F.4.2 Não é prevista a utilização de seções tubulares circulares com D/t superior a $0,45 \frac{E}{f_y}$.

ANEXO E

Corte transversal e vista lateral esquerda do galpão

